高 琴,党晓宏,蒙仲举,等.植物水分利用效率动态及其承载力估算——以毛乌素沙地典型植被为例 [J]. 中国环境科学, 2025,45(9):5129-5142.
Gao Q, Dang X H, Meng Z J, et al. Dynamics of plant water use efficiency and estimation of its carrying capacity: Take the typical Mu Us Sandy Land vegetation as an example [J]. China Environmental Science, 2025,45(9):5129-5142.

植物水分利用效率动态及其承载力估算

——以毛乌素沙地典型植被为例

高 琴[1],党晓宏[1,2*],蒙仲举[1],刘 阳[3] (1.内蒙古农业大学沙漠治理学院,内蒙古 呼和浩特 010011；2.内蒙古杭锦荒漠生态系统国家定位观测研究站,内蒙古 鄂尔多斯 017400；3.内蒙古自治区水利科学研究院,内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要：以毛乌素沙地典型植被类型为研究对象,基于 Biome-BGC 生态过程模型,模拟分析了过去 24a 的碳水通量、水分利用效率(WUE)及其驱动因子的时空动态,并估算了不同林分的土壤水分植被承载力.结果表明:碳水通量逐年递增,GPP 和 ET 年均增长速率分别为 6.42g C/m^2 和 5.45kg H_2O/m^2,WUE 以 0.006g C/kg H_2O 递减,显示出碳增效与水耗不平衡的趋势,种间竞争显著影响 WUE 的动态稳定性;灌木纯林在碳水调节关系中表现出更强的适应性,CO_2 浓度增加是导致 WUE 下降的主要驱动因子,并通过温度(间接通径系数 0.435)和 NDVI(间接通径系数 0.808)产生显著间接影响,适度调控林分结构及地表植被覆盖可有效提升区域 WUE;土壤水分植被承载力结果显示,乔木林、灌木林及灌灌混交林当前栽植密度尚有提升空间,分别可上调 15.07%、3.78%、16.72%.研究有助于厘清干旱半干旱区不同植被类型的水分利用机制,明确植被恢复工程在水资源约束下的生态限度,为区域"以水定植"政策制定及沙地生态系统可持续管理提供理论支持和决策依据.

关键词：不同植被类型；毛乌素沙地；水分利用效率；土壤水分植被承载力
中图分类号：X173 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)09-5129-14

Dynamics of plant water use efficiency and estimation of its carrying capacity: Take the typical Mu Us Sandy Land vegetation as an example.

GAO Qin[1], DANG Xiao-hong[1,2*], MENG Zhong-ju[1], LIU Yang[3] (1.College of Desert Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China；2.Inner Mongolia Hangjin Dsert Ecological Position Rsearch Station, Ordos 017400, China；3.Inner Mongolia Autonomous Region Water Resources Research Institute, Hohhot 010018, China). *China Environmental Science*, 2025,45(9)：5129~5142

Abstract：Based on the Biome-BGC ecological process model, the spatial and temporal dynamics of carbon and water flux, water use efficiency (WUE), and its driving factors in the past 24 years were simulated and analyzed, and the soil moisture vegetation carrying capacity of different stands was estimated. The carbon and water fluxes increased year by year, and the average annual growth rates of GPP and ET were 6.42g C/m^2 and 5.45kg H_2O/m^2, respectively. WUE decreased by 0.006g C/kg H_2O, showing a trend of carbon efficiency and water consumption imbalance. Interspecific competition significantly affected the dynamic stability of WUE. The shrub pure forest showed stronger adaptability in the carbon and water regulation relationship. The increase of CO_2 concentration was the main driving factor leading to the decrease of WUE, and had a significant indirect effect through temperature (indirect path coefficient 0.435) and NDVI (indirect path coefficient 0.808). Moderate regulation of stand structure and surface vegetation coverage can effectively improve regional WUE. The results of soil moisture vegetation carrying capacity showed that there was still room for improvement in the current planting density of arbor forest, shrub forest and shrub-shrub mixed forest, which could be increased by 15.07%, 3.78% and 16.72%, respectively. The study is helpful to clarify the water use mechanism of different vegetation types in arid and semi-arid areas, define the ecological limits of vegetation restoration projects under the constraints of water resources, and provide theoretical support and decision-making basis for regional 'planting by water' policy formulation and sustainable management of sandy ecosystem.

Key words：different vegetation types；Mu Us Sandy Land；water use efficiency；soil moisture vegetation carrying capacity

---

收稿日期：2025-02-20
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFC3205200);内蒙古自治区直属高校基本科研业务费资助项目(BR220401);内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2023MS03002)

* 责任作者, 副教授, dangxiaohong1986@126.com

水资源供给不足已成为当前最严峻的生态环境问题之一[1],尤其在干旱与半干旱地区,降水稀少直接制约了植被的分布格局、生物量积累与生态系统稳定性[2].毛乌素沙地作为典型的半干旱地区,因早年过度放牧和滥垦等不合理的人为活动导致植被面积急剧退化,经过近 50a 的一系列大规模植被恢复工程得到了明显改观[3],过去 30 余载植被覆盖面增幅为 17.65%[4],NDVI 整体为上升趋势[5].但由于开展过程中未进行考量林分栽植规模、栽植密度等问题,致使现阶段水资源供应(主要为降水)与水消耗(蒸散发)出现失衡现象[6].针对上述现象,以及区域植被覆盖提升与水资源承载力之间的非线性博弈关系,部分学者提出能否在当地水资源最大承载力下满足植被恢复工程生态效益的思考[7].基于此,亟需探明水资源与植被恢复的互馈机制,明确不同林分结构水分利用情况,构建区域内水分高效利用的配置模式,从而为干旱半干旱区提升区域水分利用效率、植被恢复及衰退林的保育提供理论依据和科学手段.

植被水分利用效率(WUE)可以反映植被光合作用碳同化与水分消耗之间的关系[8],对理解陆地生态系统的碳水平衡至关重要[9].对于干旱半干旱条件下大面积造林成活率、保存率低等问题[10],急需弄清区域水资源限制下所能承载的植被种类、数量和格局,而单一的水分利用效率无法估算水资源约束下的植被恢复阈值,因此还需引出土壤水分植被承载力解决上述问题.土壤水分植被承载力是指在一至多年内,植物在可利用土层内的土壤水分消耗量不超过土壤水分补给量时,所能维持特定植物群落健康生长的最大植被密度或生物量[11].即植被不损害健康的前提下,研究土壤水分承载植被的能力或所能承受的最大个体数量[12],其核心思想是通过衡量土壤水分的输入(如降水)与输出(如蒸散发)之间的动态平衡,确定在一定时间尺度内维持植被健康生长的最优状态.该指标不仅可用于判断当前植被是否超载,也为干旱地区实现“以水定植”、优化植被建设密度与结构提供理论依据.在生态系统构建、人工林管理、水土保持与退化生态系统修复中,土壤水分植被承载力日益成为调控人类活动强度与自然资源承载力之间关系的重要桥梁[13].经过前人就土壤水分植被承载力的模型模拟计算的研究比较[14],筛选出相较精度较高的 Biome-BGC 模型,该模型的估算过程基于土壤数据、植被生理参数及气候数据,其中土壤数据与植被参数为实测值,可以大大提升该模型的准确性,因此 Biome-BGC 模型近年来被广泛应用于水分利用效率与土壤水分植被承载力的研究中[15-16].Biome-BGC 模型作为基于气象、生理参数的生态过程模型,在碳水通量模拟中成效显著[17].已有研究应用该模型探究了不同植被类型林地的水分利用效率差异[18],优化了农作物总初级生产力的预测能力(但蒸散发模拟未获提升)[19],模拟了典型植被碳水通量并分析数据同化对精度的影响[20],还结合遥感手段得出蒸散发与总初级生产力的年增长速率[21].当前干旱半干旱地区相关研究存在局限:(1)多依赖模型估算,尺度集中于典型区域大尺度或单一植被小尺度;(2)模型所用生理生态指标多为参考值,降低结果准确性;(3)缺乏多植被类型对比,难揭示配置模式对承载力的调控效应.后续需增加实测参数,加强典型植被水分利用效率差异研究.

鉴于此,本研究选择毛乌素沙地乌审旗区内沙地柏(*Sabina vulgaris*)、黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)、沙柳(*Salix psammophila*)、樟子松(*Pinus sylvestris*)、黑沙蒿×沙柳、黑沙蒿×柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)为研究对象,聚焦三核心问题:不同植被水分利用效率(WUE)差异、自然因素对林分碳水通量及 WUE 的影响、自然降水下植被覆盖合理阈值的科学估算.通过调查林分栽植与土壤特征,测定植被生理及土壤理化参数,结合 Biome-BGC 模型,探究林地水分利用特征及生物物理因子的影响,估算植被理论覆盖阈值,为干旱半干旱区水资源承载下的植被配置提供依据,推动生态恢复由“量的扩张”向“质的提升”转变,避免因超载植被造成水资源亏空及二次退化.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在中国北部毛乌素沙地腹部内蒙古自治区鄂尔多斯市乌审旗区域(38°53′13″N~39°01′39″N,109°11′49″E~111°22′49″E)进行.该区域地处半干旱草原与荒漠过渡带,是典型的风沙-植被-水资源复合生态系统.区域内地势平坦,海拔

1275~1283m(表 1).地下水埋深普遍在 3~5m 之间,存在多层第四系孔隙潜水含水层,矿化度 1.2~2.5g/L,局部地区通过人工绿洲灌溉系统实现水资源补给.地表水体以季节性河流和湖泊为主,其中无定河支流穿境而过,但径流量呈现显著的季节波动性(6~9 月占全年径流量的 78%).该地区属于生态系统较为脆弱的半干旱温带大陆季风气候,昼夜温差大,月平均气温 8.39℃,年平均风速 4m/s,年均降水量在 350~400mm 之间,年蒸发量在 2200~2800mm 之间,干燥指数达 5.6~6.8,水分亏缺特征显著.土壤质地以砂粒(86.25%)为主,土壤容重 1.49~1.62g/cm^3,土壤结构较疏松,保水性能差,土壤饱和导水率高达 35~50cm/d,持水能力仅 4%~8%,易起风沙.近 50a 一系列生态恢复工程的开展,毛乌素沙地植被覆盖情况大幅度改善[22].其中乌审旗改善面积达 4288.65km^2,占总面积的 36.88%,其中人工林面积占比达 42%,天然恢复植被占 58%,形成"外围灌草固沙带-中部乔灌防护网-内部集约绿洲"的圈层结构.现存植被以沙生植物为主,包括:黑沙蒿(先锋固沙种)、沙地柏、沙柳和柠条锦鸡儿(优势灌木)、樟子松和小叶杨(*Populus simonii*)(乔木建群种)、以及针茅(*Stipa glareosa*)和沙米(*Agriophyllum squarrosum*)(伴生草本)等.

表 1　样地基本特征

Table 1　Basic characteristics of sample plot

植被类型	经纬度	坡度	坡向	海拔(m)	林分密度(hm^2)	株高(m)		冠幅(m)	基径(胸径)(mm)
Sv	38°57′37.26″E 109°17′43.86″N	3°	南	1278	3033	0.67±0.19		0.80±0.24	1.02±0.26
Ao	38°53′18.36″E 109°11′48.58″N	2°	南	1275	3767	0.62±0.14		0.98±0.15	0.72±0.21
Sp	38°59′15.84″E 109°21′24.56″N	5°	南	1278	733	2.27±0.31		2.19±0.16	0.87±0.20
Ps	39°2′16.09″E 109°23′5.86″N	2°	南	1283	300	5.06±1.18		3.07±0.40	129.79±27.21
Ao×Sp	38°59′10.41″E 109°21′31.21″N	4°	南	1281	2300(1:8)	Mixed *Sp*	3.17±0.80	2.88±0.45	1.11±0.33
						Mixed *Ao*	0.78±0.13	1.03±0.06	0.70±0.20
Ao×Ck	39°1′42.29″E 109°23′10.06″N	2°	南	1283	2500(1:7)	Mixed *Ck*	2.12±0.44	2.80±0.74	1.15±0.35
						Mixed *Ao*	0.70±0.16	1.05±0.13	0.92±0.23

注:Sv、Ao、Sp、Ps、Ao×Sp、Ao×Ck分别表示沙地柏纯林、黑沙蒿纯林、沙柳纯林、樟子松纯林、黑沙蒿×沙柳混交林、黑沙蒿×柠条锦鸡儿混交林,下同.

1.2　样地选择与样品采集

通过调查当地林业资料,选择研究区内地势较为平坦 1998 年人工营造的典型植被:沙地柏纯林(Sv)、黑沙蒿纯林(Ao)、沙柳纯林(Sp)、樟子松纯林(Ps)、黑沙蒿×沙柳混交林(Ao×Sp)、黑沙蒿×柠条锦鸡儿混交林(Ao×Ck)(全文涉及样地描述均使用缩写)为试验样地,使用大疆精灵 4 无人机进行近地面航拍,对样区内植被覆盖情况进行调查,选择中等覆盖度、立地条件基本一致的 3 个重复点.每个重复点内设置 20m×20m 标准采样区为试验样地,对样地内林分密度、林下植被特征进行调查;各样地选择代表性植株 10 株,测定每株的树高和胸径(基径),样地详细特征见表 1.

1.3　Biome-BGC 模型

Biome-BGC 模型(http://www.ntsg.umt.edu/project/biome-bgc)是由美国国家大气研究中心(NCAR)和蒙大拿大学的数值地形动态模拟小组(NTSG)共同研究的地球生物化学循环模型,该模型主要模拟陆地生态系统的大气、植被、枯落物和土壤中的水、碳和氮的储存和流动[23].其主要输入内容包括:物理站点特定参数、气象数据和生理生态参数,其中日尺度气象数据通过中国气象数据网(http://data.cma.cn/)得到(来自乌审旗站点(53644)).其余驱动模型运行所需的站点信息与生态生理参数的具体取值和获取详见本课题组论文[24].模型输出指标包括 SWC、GPP 和 ET 等模拟指标.

模型可能存在的误差主要来源于降水数据的空间插值误差可能对土壤水平衡产生影响,针对这一问题团队利用土壤水同位素(δ^2H、δ^{18}O)观测约束了水分的运移路径[24],更充分的弥补了土壤水平衡

可能出现的问题.

1.4 计算与统计分析

计算水分利用效率公式为[25]:

$$\mathrm{WUE}=\frac{\mathrm{GPP}}{\mathrm{ET}} \tag{1}$$

式中:WUE 为林地的水分利用效率,g C/kg H_2O;GPP 为总初级生产力,g C/m^2;ET 为蒸散发,kg H_2O/m^2.

土壤水分植被承载力公式为:

$$\rho=\left(\mathrm{SWS}\times\left(1-\frac{\mathrm{WP}}{\theta_m}\right)\right)\times\mathrm{WUE}\div C_i\div W\times 10 \tag{2}$$

式中:ρ 为林地达到土壤水植被承载力的密度,株/hm^2;SWS 为储存在土壤中的水,mm;WP 为土壤萎蔫系数,为 1.0%[26];θ_m 为土壤含水率(代入各植被 2023 年实测土壤含水率均值),%;WUE 为水分利用效率(代入 2023 年各植被水分利用效率);C_i 为含碳系数一般为 0.5;W 为单株生物量,kg.

采用 IBM SPSS Statistics 25 和 Origin 2021 软件进行多元统计分析,Pearson 相关系数计算水碳通量与影响因子之间的关系.针对多变量系统中存在的共线性干扰问题,本研究采用通径分析方法解析气象因子对毛乌素沙地碳水通量与 WUE 的作用机制.鉴于自变量间存在显著的多重共线性,传统相关分析难以准确解析单一变量对因变量的独立效应.通过构建通径模型,将简单相关系数分解为直接通径系数和间接效应值,定量表征气象要素对碳水过程的直接影响及其通过其他变量传递的间接作用.该方法有效区分了气温、降水等关键因子对 GPP、ET 和 WUE 的直接驱动强度与链式传递路径,为揭示干旱区生态系统碳水耦合过程的控制机理提供了可靠的数理分析框架[27].

2 结果与分析

2.1 生物物理因子与 GPP、ET 和 WUE 动态特征

2.1.1 生物物理因子年际变化特征 2000~2023 年生物物理因子年际变化特征如图 1 所示.CO_2 浓度呈显著上升趋势,年增长速率为 2.317μmol/(mol·a) (P<0.01).降水量和年均气温年际波动大,但总体呈增加趋势,增长速率分别为 2.593mm/a、0.036℃/a、0.006(P<0.01).NDVI 同样显著上升,但整体波动较小,2005~2010 年间小幅稳定增加,但降水量与气温波动较大,说明气候变化对植被生长具有显著的滞后性和累积性[27].

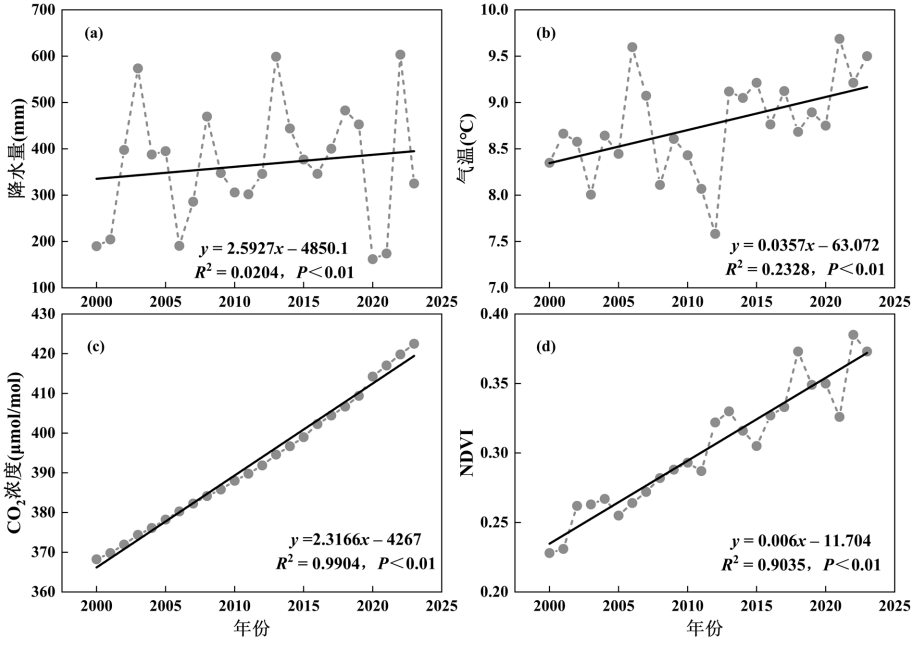


图 1 2000~2023 年生物物理因子动态变化特征

Fig.1 The dynamic change characteristics of biophysical factors from 2000 to 2023

2.1.2 模拟结果验证 应用杨梅焕等[28]在毛乌素沙地提供的 MODIS 遥感产品数据集(GPP: MOD17A2H,ET:MOD16A2)对 Biome-BGC 模型的模拟结果进行空间格局一致性分析.由于 MODIS 产

品属基于遥感反演和模型算法的次级数据产品,其与地面实测值存在系统性偏差[29],故本研究重点考察模拟结果与遥感产品在时空变化趋势和空间异质性上的匹配度.对比发现(图 2(a−c)),模型预测值较 MODIS 产品普遍偏高,但两者年际波动特征和季节动态具有显著同步性(相关系数 r>0.85).产生差异的原因可能与输入模型的不确定性有关,驱动数据中气象要素的空间插值误差会通过模型传递放大;此外与极端气候事件所影响的 GPP/ET 模拟对阈值响应敏感也有一定的关系[30].将观测数据与模拟结果拟合后发现(图 2(d–f)),GPP 和 ET 的 R^2 分别为 0.72、0.78,显著性均为 P<0.001,说明每对数据的线性关系较强,拟合结果可信度较优.WUE 拟合结果发现其线性结果较差,这是因为 WUE 均为 GPP 与 ET 的比值;计算其拟合结果的均方根误差(RMSE)为 0.21g C/kg·H_2O,越接近于 0 的 RMSE 值表示模型的预测越准确,也进一步印证了模拟结果的可信度.综上所述,结合高程分异和纬度梯度分析,Biome− BGC 模型在表征水热条件限制下的生产力空间分异规律时表现出较强的生态合理性.

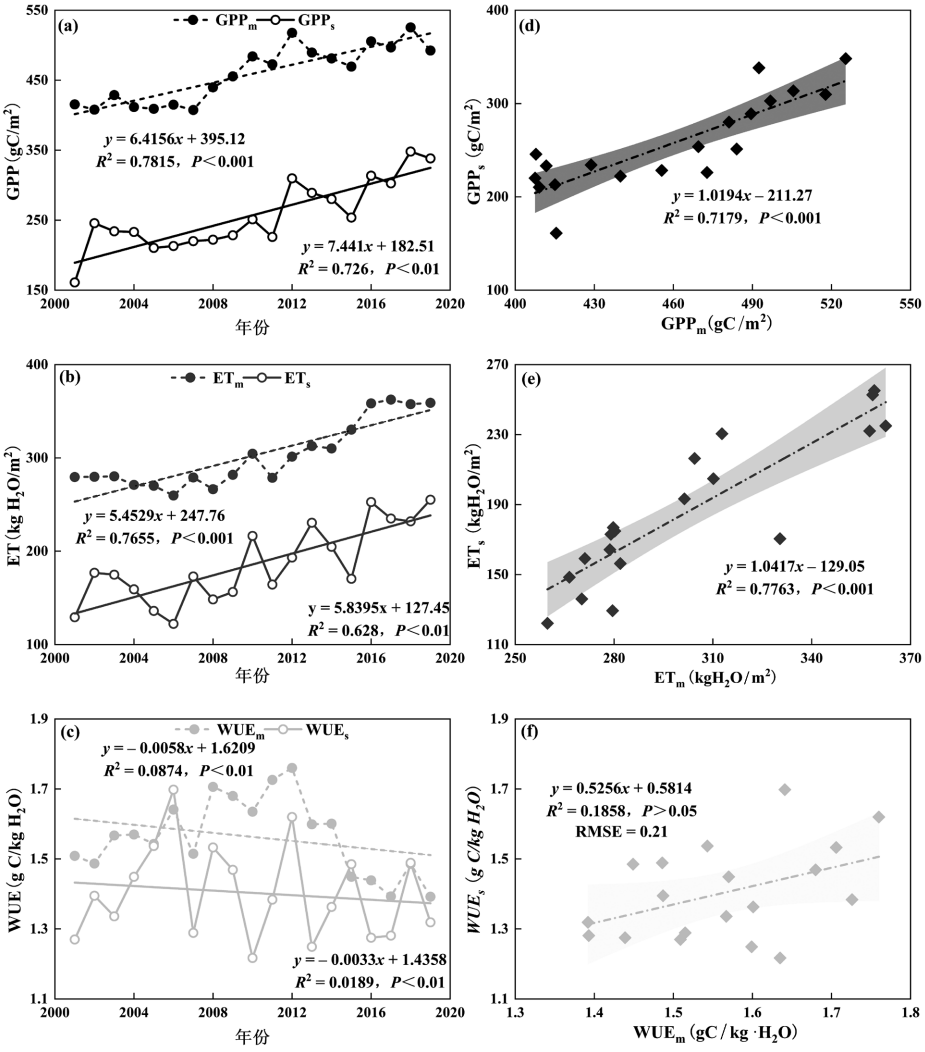


图 2　2000~2023 年模型模拟和观测数据 GPP、ET 和 WUE 对比

Fig.2　Comparison of simulated and measured GPP, ET, and WUE from 2000 to 2023

模拟值角标为 m,观测值角标为 s

2.1.3　不同植被类型 GPP、ET 与 WUE 变化特征　不同植被类型碳水通量年际变化规律相似(图 3),均呈逐年显著递增趋势(P<0.01),其年平均线性增长速率分别为 6.42g C/m^2、5.45kg H_2O/m^2.GPP 的年际动态与 NDVI 的年际变化显著同步,不同植被类型间呈现乔木林>灌灌混交林>灌木林的梯度特征,其中

乔木林 GPP 均值显著高于灌灌混交林(5.65%),比灌木林高 17.46%;灌灌混交林 GPP 均值是灌木林的 1.11 倍,Ao×Sp 年均 GPP 较 Ao 高了 17.16%,较 Sp 高了 13.90%.ET 年际动态与气温变化显著相关,其植被类型间差异特征与 GPP 一致,其中乔木林 ET 均值显著高于灌灌混交林(6.59%)和灌木林(41.93%);而灌灌混交林 ET 均值是灌木林的 1.33 倍,Ao×Sp 年均 ET 较 Ao 高 45.15%,较 Sp 高 23.06%.

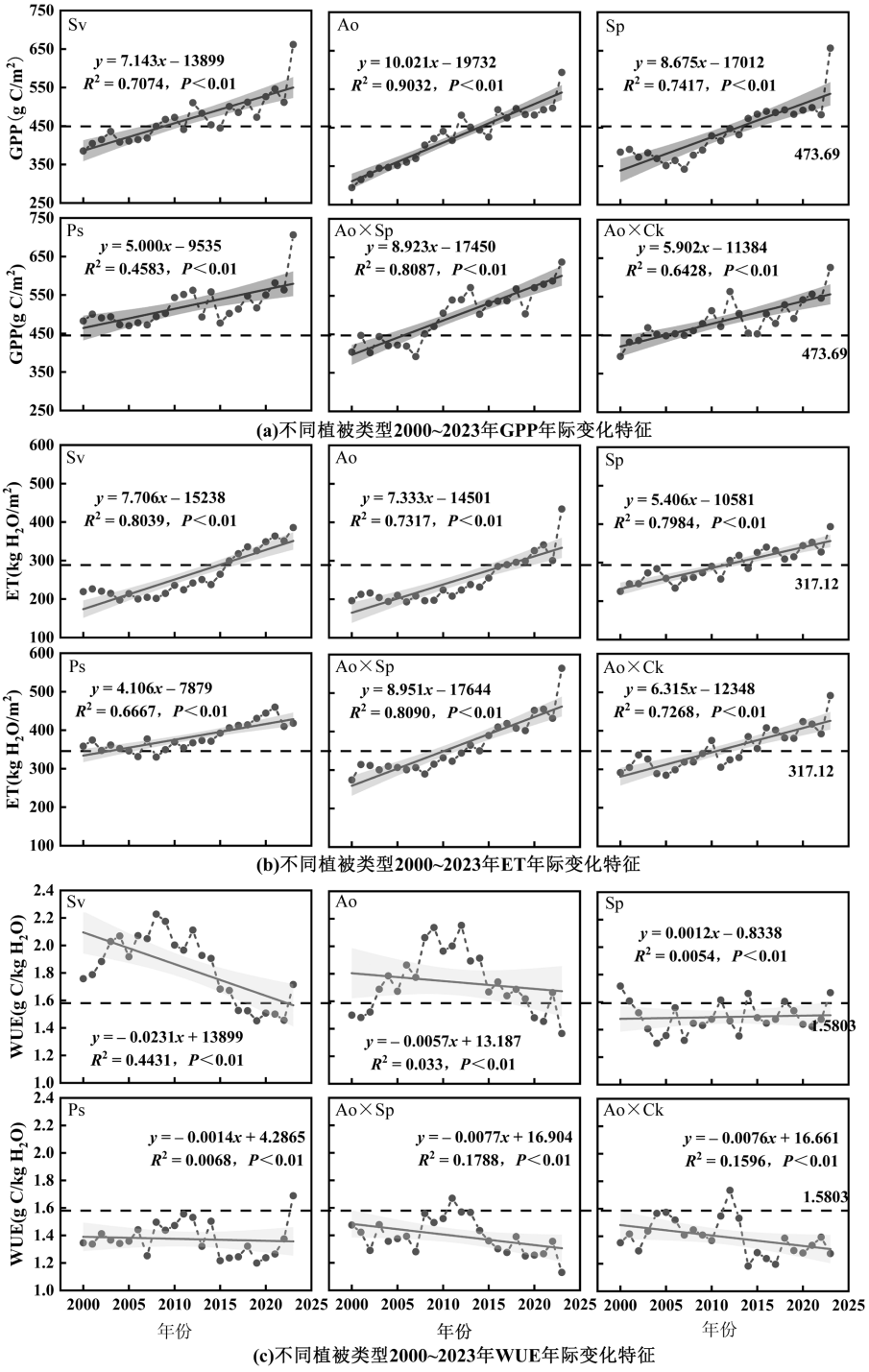


图 3 不同植被类型 2000~2023 年 GPP、ET 与 WUE 年际变化特征

Fig.3 The interannual variation characteristics of GPP, ET and WUE in different vegetation types from 2000 to 2023 were analyzed

黑色直虚线为不同植被各指标均值

研究区各植被 WUE 均值变化规律可以分为两个阶段,其中 2000~2010 年植被 WUE 以 0.02g C/kg

H_2O 每年的速率增加,2010~2023 年植被 WUE 以 0.05g C/kg H_2O 每年的速率递减.不同植被类型间的表现规律均为灌木林>灌灌混交林>乔木林,其中灌灌混交林 WUE 均值是乔木林的 1.03 倍;灌木林 WUE 均值较乔木林高 23.62%,较灌灌混交林高 20.10%,Ao×Sp 年均 WUE 较 Ao 下降了 23.72%,较 *Sp* 下降了 4.77%.结果表明,毛乌素沙地不同植被类型碳水通量和 WUE 对干旱环境的响应具有显著异质性,灌木纯林在干旱半干旱区碳水调节关系中表现出更优的适应性.

2.2　气候和植被对 GPP、ET 和 WUE 变化的控制

2000~2023 年,研究区内的 GPP、ET 和 WUE 与 NDVI 和 CO_2 浓度之间呈极显著相关关系(P<0.001),ET 和 WUE 与气温呈非常显著相关关系(P<0.01),GPP、ET 和 WUE 与降水量均没有显著的相关关系(P>0.05).不同植被类型 GPP、ET 和 WUE 与生物物理因子的相关关系存在规律,其中 GPP 和 ET 与气温、NDVI 和 CO_2 浓度之间均呈现正相关,各因子对不同植被类型 GPP 和 ET 的重要性规律一致,依次为 CO_2 浓度、NDVI 和气温.WUE 与气温、NDVI 和 CO_2 浓度之间呈负相关(P<0.05),各因子对不同植被类型 WUE 的重要性有显著差异,其中 Sv、Ps 和 Ao×Ck 的主要驱动因子为 CO_2 浓度,Ao 和 Ao×Sp 的主要驱动因子为气温,Sp 的主要驱动因子为 NDVI.总体而言,影响 GPP、ET 和 WUE 的主要因子包括 CO_2 浓度、NDVI 和气温.

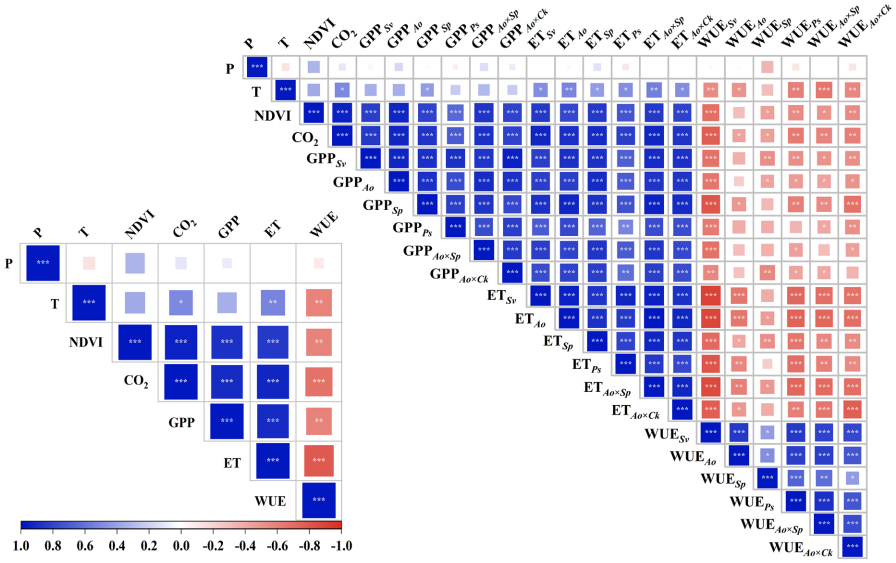


图 4　GPP、ET、WUE 与生物物理因子之间的相关性分析

Fig.4　Correlation analysis between GPP, ET, WUE, and biophysical factors

大图为不同植被类型 GPP、ET、WUE 与生物物理因子的相关性分析,小图为所有植被 GPP、ET、WUE 均值与生物物理因子的相关性分析

* P<0.05,** P<0.01,*** P<0.001

为进一步厘清毛乌素沙地典型植被 GPP、ET 和 WUE 变化的主导因子,对比通径分析结果可以看出(图 5(a)),2000~2023 年 CO_2 浓度和 NDVI 是控制 GPP 变化的主导因子,直接通径系数分别为 0.627 和 0.391,CO_2 浓度通过 NDVI 到 GPP 的间接通径系数为 0.592,说明 CO_2 浓度通过 NDVI 对 GPP 也有很强的间接影响.不同植被类型的主导因子存在一定的差异,其中乔木林 2000~2023 年 CO_2 浓度的通径系数为 0.632,远高于 GPP 与其他因子的通径系数(图 5(d)),说明乔木 GPP 对 CO_2 浓度的依赖性较强;灌木林(图 5(g))和灌灌混交林(图 5(j))主导因子与研究区所有植被 GPP 均值的结果相似,均以 CO_2 浓度和 NDVI 主导.ET 的通径分析结果表现出不同的结果,由图 5b 可以看出 CO_2 浓度的通径系数为 0.904,远高于 ET 与其他因子之间的通径系数,CO_2 浓度通过 NDVI 到 ET 的间接通径系数为 0.853,说明 CO_2 浓度通过 NDVI 对 GPP 有很强的间接影响;不同植被类型间的主导因子没有明显差异(图 5(e)、图 5(h)和图 5(k)),均以 CO_2 浓度为主导因子.

根据所有植被 WUE 均值与各因子的通径分析

可以看出(图 5(c)),WUE 的主导因子相较于碳水通量的多,其中 CO_2 浓度、NDVI 和气温对 WUE 的通径系数分别为 0.825、0.398 和 0.330,CO_2 浓度通过气温和 NDVI 对 WUE 的间接通径系数分别为 0.435 和 0.808,表明 WUE 动态变化可以由 CO_2 浓度通过气温和 NDVI 产生较强的间接影响.不同植被类型的主导因子重要值存在一定的差异(图 5f、图 5i 和图 5l),其中灌木林 CO_2 浓度和 NDVI 对 WUE 的直接通径系数远高于乔木林和灌灌混交林,这可能与灌木林较高的 NDVI 有关.综上所述,CO_2 浓度是限制研究区 2000~2023 年 GPP、ET 和 WUE 的关键气象因子.随着植被恢复工程的大规模推进,NDVI 也将成为重要的影响因子.

2.3 土壤水分植被承载力估算

2.3.1 不同植被类型生物量变化特征 不同植被类型单株生物量与单位面积内的林分生物量均表现出显著差异(P<0.05).其中单株生物量的变化范围在 0.99~26.29kg,最大生物量较最小生物量高 26.52 倍.Sp 单株生物量与 Ao×Sp 中的沙柳相比减少了 1.41%,Ao 较其相比减少了 16.73%;Ao×Ck 中的黑沙蒿与 Ao 相差 51.04%.不同植被在单位面积内的林分生物量波动范围为 2.03~7.89t/hm^2.乔木林生物量最大,最大生物量与最小生物量之间相差 111.26%.Ao×Sp 中的黑沙蒿林分生物量比 Ao 低了 58.70%,混交中的沙柳林分生物量与 Sp 相差 2.71 倍;Ao 林分生物量与 Ao×Ck 中的黑沙蒿相差 15.10%.

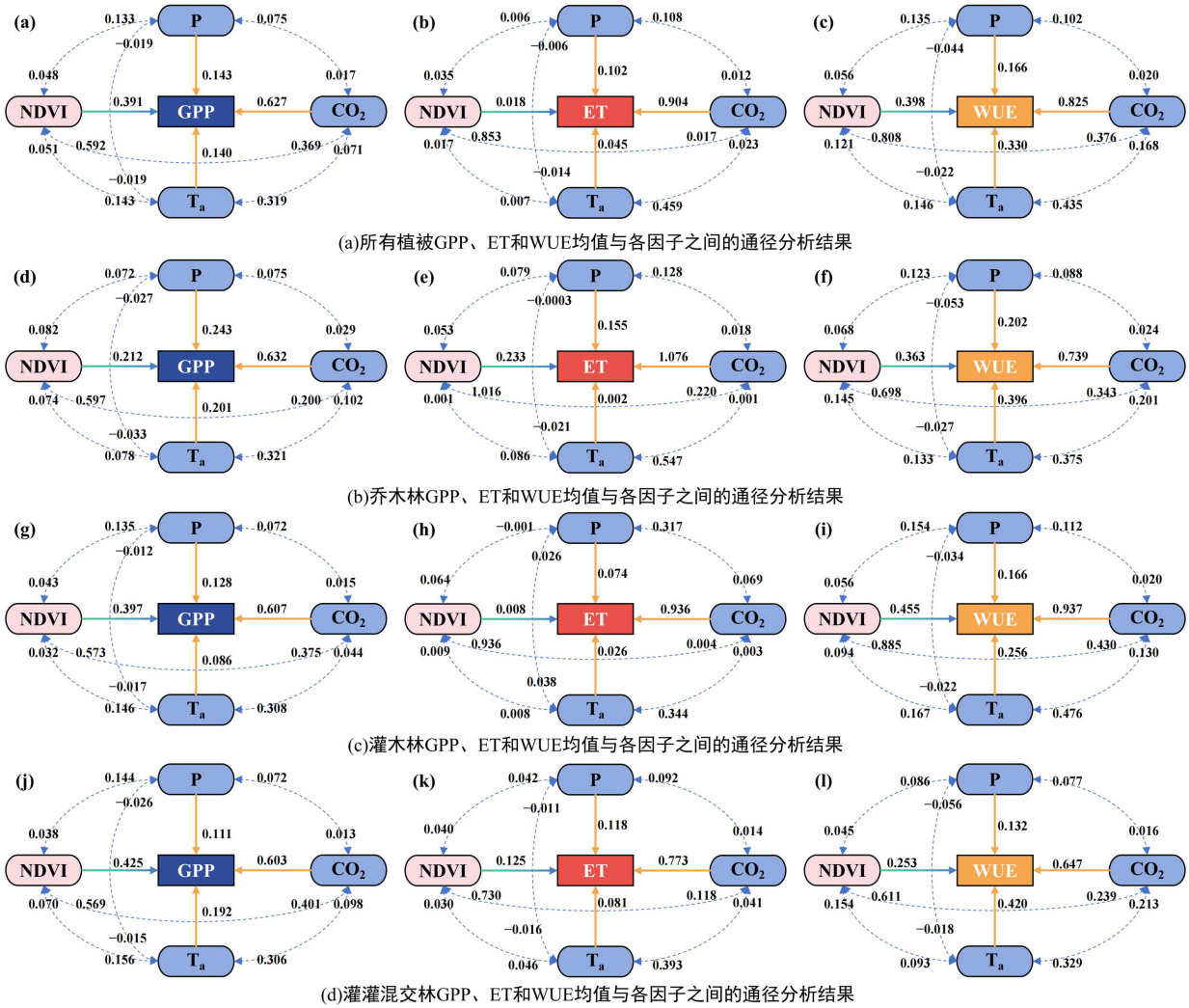


图 5 GPP、ET、WUE 与生物物理因子之间的通径分析结果

Fig.5 Path analysis results between GPP, ET, WUE, and biophysical factors

实线上的数字代表直接通径系数,点线上的数字代表间接通径系数,蓝色圆框表示气象因子(降水量(P)、气温(Ta)、CO_2 浓度(CO_2)),粉色圆框表示植被因子(NDVI)

研究区水资源承载力最大时,不同植被林分生物量相较原始林分生物量均有一定的提升,可以说明各样地现阶段所承载的植被未造成土壤水分亏缺.不同植被类型间盈余生物量差异显著(P<0.05),波动范围为 132.12~1188.83kg C/hm^2.乔木林盈余生物量均值为 1188.83kg C/hm^2,灌灌混交林盈余生物量均值为413.99kg C/hm^2,灌木林盈余生物量均值为186.36kg C/hm^2,乔木林较灌灌混交林增加了 2.87 倍,较灌木林增加了 6.38 倍.最小盈余生物量与最大盈余生物量相差 9.00 倍,Ao×Sp 的沙柳盈余生物量比 Sp 增加 1.26 倍,混交林中的黑沙蒿较 Ao 增加了 59.32%;Ao×Ck 中的黑沙蒿较 Ao 盈余生物量增加了 63.62%.

2.3.2　不同植被土壤水分植被承载力变化特征

利用 Biome-BGC 模型估算的 2023 年水分利用效率,结合实地观测的土壤水分、生物量等指标,得出不同植被在研究区内的土壤水分植被承载力(如图 7),各林分土壤水分植被承载力波动范围在 345~3900 株/hm^2,整体上植被承载力提升了约 6.19%.乔木林植被承载力为 345 株/hm^2;灌木林中黑沙蒿植被承载力最大(3900 株/hm^2),其次为沙地柏(3112 株/hm^2)和沙柳(772 株/hm^2);灌灌混交林中 Ao×Ck 土壤水分植被承载力达 2730 株/hm^2(柠条锦鸡儿 415 株/hm^2,黑沙蒿 2315 株/hm^2),Ao×Sp 仅次于 Ao×Ck,植被承载力达 2557 株/hm^2(沙柳 337 株/hm^2,黑沙蒿 2220 株/hm^2).Sp 植被承载力较 Ao×Sp 中的沙柳多了 2.29 倍,Ao 较 Ao×Sp 中的黑沙蒿增加了 75.66%;Ao 较 Ao×Ck 中的黑沙蒿增加了 73.85%.

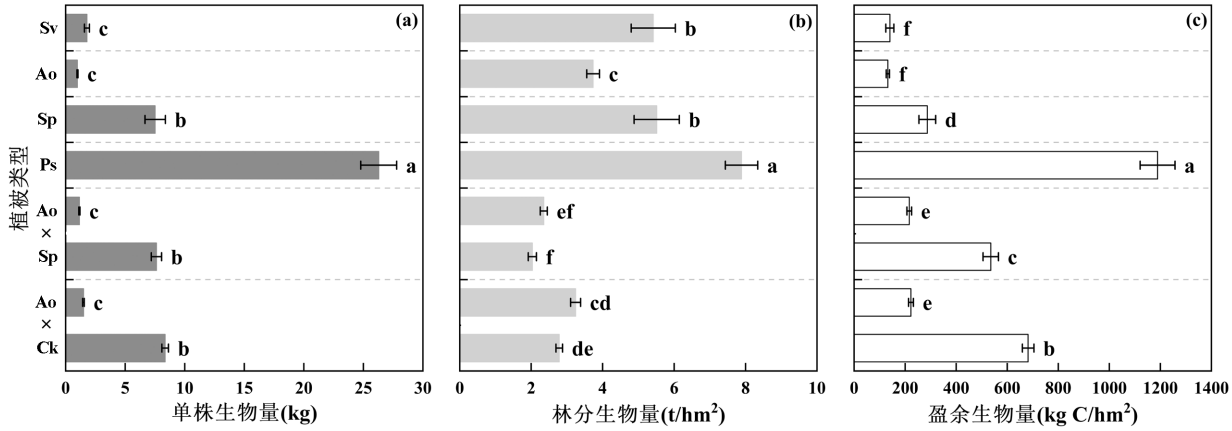


图 6　不同植被类型生物量变化特征

Fig.6　Biomass variation characteristics of different vegetation types

小写字母表示不同植被类型间生物量的差异性(P<0.05)

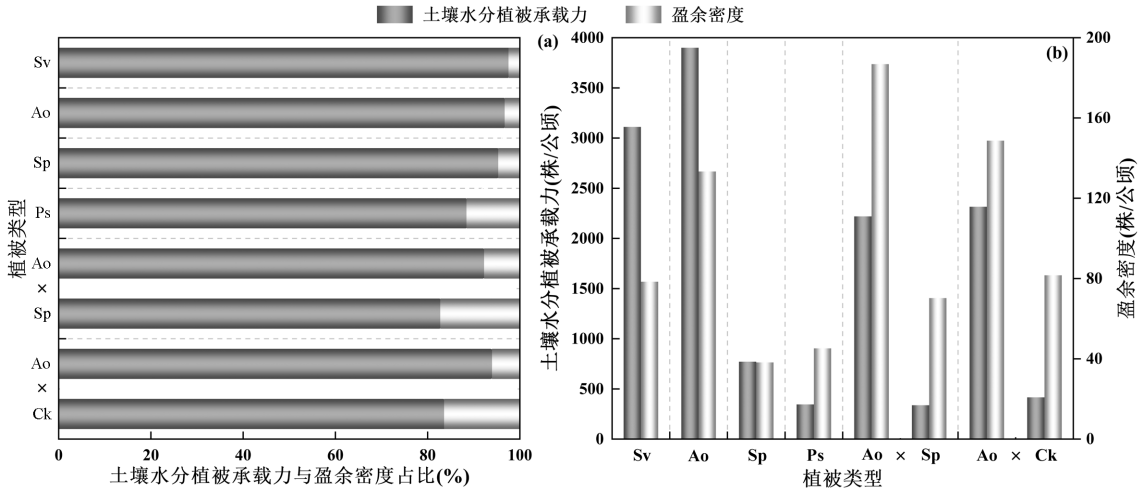


图 7　不同植被类型土壤水分植被承载力及其盈余密度

Fig.7　Soil water carrying capacity and surplus density of different vegetation types

各林地土壤水分植被承载力较初始调查的林分密度大,即在水资源利用最大化的基础上植被栽植密度增加部分称其为盈余密度.Ao×Sp 和 Ao×Ck 中黑沙蒿的盈余密度均较高,分别比 Ao 增加了 40.13%和 11.55%;较 Sp 增加了 83.98%.灌木林中黑沙蒿盈余密度最大(113 株/hm^2),其次为沙地柏(78 株/hm^2),沙柳最小(38 株/hm^2),Ao 盈余密度与 Sv 和 Sp 分别相差 1.70 倍和 3.49 倍.乔木林盈余密度为 45 株/hm^2,较灌灌混交林相差 1.69 倍,较灌木林减少了 84.19%.

3 讨论

3.1 不同植被类型碳水通量时空动态

本研究通过长期观测与模型模拟相结合,揭示了毛乌素沙地植被碳水通量的时空动态特征及其调控机制.研究区植被 GPP 多年均值为(473.69±59.75)g C/(m^2·a),ET 多年均值为(317.12±51.67)kg H_2O/(m^2·a),与 Mu[31]、袁洪艺[32]等在毛乌素沙地的研究结果相似,但整体较其他研究结果偏高.这种差异的形成机制主要涉及个生态过程维度:首先,水热耦合效应发挥了基础性作用,研究区降水量更为充沛,温度适宜,具备更利于植被生长的生态条件;其次,植被群落结构特征通过叶面积指数和根系分布深度直接影响碳水交换,本区以天然草地和灌木为主,其深层根系能有效利用土壤深层储水,延长光合作用持续时间;再者,最小人为干扰使植被保持自然演替状态,避免了耕作活动对土壤碳库的破坏和水分无效蒸发[27-29].这些机制共同构成了研究区高生产力维持的"降水-植被-土壤"正反馈循环.

在探讨 WUE 年际变化时,研究区所有植被 WUE 多年均值为(1.50±0.18)g C/kg H_2O,并以 0.05g C/kg H_2O 的速率递减.这一结果与 Chen 等[33]在陕西安塞区的研究趋势一致,但整体较其研究结果低,该差异可能归因于安塞地区水热条件更优,从而提升了单位水分利用下的碳固定效率.WUE 在不同年限间的波动趋势差异不显著(P>0.05),有研究发现是因为当地 GPP 与 ET 增长速率差异较小,导致植被单位耗水质量所固定的 CO_2 量达到一个相较稳定的波动范围,从而出现年 WUE 变化趋势差异性不显著的现象[34].灌木具有较高的比叶面积和木质部导管直径变异系数,使其在干旱条件下能更有效地进行水力调节.本研究表明,不同植被类型间的碳水通量表现为乔木林最大,WUE 则是灌木林最高,与吴冠宇等[35]对黄土高原典型植被的研究结果有所出入,造成研究结果不同的原因与数据集分辨率的差异[36]、人为活动干扰所导致的 CO_2 浓度和 NDVI 波动[27]、以及各植被碳氮比实测数据试验操作误差等都有一定的关系.

Biome-BGC 模型在干旱半干旱区的应用受到多方面限制,这些限制本质上源于模型结构与实际生态过程的不匹配:模型对降水脉冲响应的模拟不足,难以刻画短时强降水事件引发的植被"绿色骤增"现象,这由于模型采用日均气象数据而忽略了干旱区降水事件的离散分布特征;参数化方案未能充分考虑干旱区植物特有的生理适应策略[36],尤其在土壤性质、根系深度和植物功能类型设定上易引入系统误差;该模型缺乏对人类干扰(如放牧、土地退化、植被恢复等)的显式考虑,可能低估其对区域碳水循环的影响.因此,未来研究应从以下几个方面优化模型精度与适用性:(1)引入多源遥感数据(如 MODIS、Sentinel-2)提升输入数据的空间与时间分辨率;(2)结合现场观测数据开展参数本地化,提高模型适应性[37];(3)集成人类活动模拟模块,考虑土地利用变化、CO_2 浓度增加和管理措施等因素的影响;(4)与其他生态系统模型(如 CLM、CABLE)进行耦合或对比,以提升结果的稳健性和泛化能力[27].通过上述措施,提升 Biome-BGC 模型在干旱半干旱区生态过程模拟中的生态适应性.

3.2 气象和植被因子对 GPP、ET 和 WUE 的调控

大量研究表明,WUE 的时空变化是由生物因子(如植被生理特征)与非生物因子(如气候变量)共同驱动的复杂过程[37-39].本研究通过相关性分析和通径分析进一步明确了主要驱动因子的作用路径与调控机制,CO_2 浓度是限制碳水通量与 WUE 的关键气象因子,年际 GPP 和 ET 变化规律与 CO_2 浓度呈极显著正相关(P<0.001),体现出其“CO_2 施肥效应”可显著促进植被光合作用强度,进而增强碳吸收能力,这与 Luo 等的研究结论一致[40-41].同时,Niu 等[42]在分析气候对水分利用效率的影响时发现气候条件会针对不同尺度的水分利用效率做出不同的响应机制.Overdieck 等[43]发现植被生理条件与环境之间的复杂机制中气孔导度受到影响,并且在调节当

地水分利用效率时气孔导度起到关键作用.干旱半干旱地区水分利用效率主要受气候的影响较大[44],且CO_2浓度与气温升高对水分利用效率的影响均小于降水波动的影响[45],但也有部分学者认为水分利用效率与降水量之间相关性不显著,后者观点与本研究结果相似,这是由于地区差异造成的干旱对WUE 累积的滞后效应所致[46].WUE 与 CO_2 浓度呈极显著负相关(P<0.001),且可以由 CO_2 浓度通过气温和 NDVI 产生较强的间接影响,这是因为温度升高导致植被气孔导度和 ET 增强,对 WUE 产生一定的负效应.

综上所述,WUE 的形成机制是具有显著的多因子交互特征,是气象条件与植被响应动态共同作用的结果.本研究虽选取 CO_2 浓度、气温、NDVI 与降水等变量作为主控因子进行分析,但仍有诸如土壤类型、植被结构、生长阶段、地下水深度及人类活动干扰等关键因子,仍存在一定的解释局限性.未来研究应进一步整合多源高时空分辨率数据,采用多因子耦合模型与过程模拟方法,全面解析干旱区 WUE 的响应机制与驱动路径,以构建更加科学、系统的区域碳-水耦合调控框架,为干旱半干旱地区生态系统管理与水资源调控提供理论支持与决策依据.

3.3　土壤水分植被承载力估算

在干旱半干旱生态脆弱区,大规模人工植被恢复虽在短期内取得了一定的生态成效,但由于早期造林过程中普遍忽视对合理栽植密度的科学规划,导致现阶段出现土壤水分亏空、地力减退、土壤干化,以及造林成活率与保存率随植被生长年限逐渐下降等问题[47],这一现象实质上源于土壤水分承载力与植被需求之间的长期不平衡.由于干旱区水分是限制植被生长与生态稳定的主要因子,厘清典型区域土壤水分对植被的承载阈值,可以有效把控当前区域内植被栽植密度,保障林地的水资源平衡的同时,缓解土壤干化和植被枯萎衰败等生态恶化现象[48].当前就土壤水分植被承载力估算已开展大量研究,洪光宇等[49]在毛乌素沙地建立径级范围不同时的沙柳土壤水分植被承载力模型,估算出沙柳最佳造林密度为 1013 株/hm^2,是本研究沙柳纯林中的栽植密度 1.40 倍,造成该结果的原因可能与笔者当前研究区域造林密度是本研究区的 2.29 倍有关,也离不开笔者在植被选择时的径级范围筛选.苗雅洁等[50]在毛不拉孔兑进行人工林植被承载力估算得出黑沙蒿最佳适宜密度为 34158 株/hm^2,柠条锦鸡儿最佳造林密度为 2467 株/hm^2,北沙柳最佳适宜密度为 1272 株/hm^2.Xia 等[51]在黄土高原估算土壤水分植被承载力发现,高密度林分随植被直径增大其土壤水分承载力从 2250 株/hm^2 增加至 2800 株/hm^2,低密度林分随直径增大时,土壤水分植被承载力从 6030 株/hm^2 下降至 3600 株/hm^2.但未有相关研究考虑到不同植被类型、配置模式和同一植被在纯林与混交林中的区别.前人研究结果均与本试验结果相悖,其预估的最佳栽植密度都较本试验大,造成该结果的原因主要有两方面,一方面是试验背景不同,不同试验间的试验样地均不相同,植被生长年限也不同,以上研究者均选取了生长年限较短的植被,部分植被还处于幼苗状态,无论从林分生物量还是冠幅面积等生长指标都与本试验出入较大;另一方面每个试验间所采用的模型办法和评判指标都存在一定的差异性,不可避免的会出现试验结果的不一致.造成土壤水分植被承载力差异性的因素有很多,地形地貌、植被生长年限[52]和土壤特征[53],甚至不同坡位间的土壤水分植被承载力都存在一定的差异性,有研究发现坡位和坡度会导致水资源分布不均,而坡向会影响光照水平,这些因素均会致使土壤水分植被承载力发生变动[54].因此,未来研究需构建多尺度、多因素耦合的承载力评估框架.应整合立地类型、地貌特征、气候变化(CO_2 浓度、降水模式)和植被生理过程(气孔导度、蒸腾效率)等关键要素,通过长期定位观测、遥感反演与过程模型耦合,量化不同因素对承载力的贡献机制.尤其需关注混交林生态系统中物种间的水分协同利用效应,以及气候变化背景下植被-土壤-大气连续体的动态响应,为干旱半干旱地区植被恢复与生态工程建设提供科学决策依据.

3.4　基于水分利用效率与土壤水分植被承载力的造林启示

本研究设定的最大情景下的 GPP、ET 和 WUE 作为理论上限,因假设年降水量理想再分配用于植被生长,在现实生态系统中难以企及[55].此外,在本研究中,逐年计算了最大情景,该情景假设年降水量可以理想地重新分配用于植被生长.因此,要接近最大

情景,除了通过植被恢复直接增加植被覆盖度外,最重要的是提高植被对雨水资源的利用能力,学者们对不同地区进行了许多有效的尝试[56].首先,为了保证植被的供水,雨水资源的时空分配是必要的.其次是需要提高植被的水分利用效率.优化种植结构、调节径流、增加土壤入渗等现代农业措施有助于实现这一目标[57].在这些现有技术的基础上,还需要进一步研究节约用水和利用雨水的新方法.

当前区域林分密度处于合理区间,且土壤水分植被承载力尚有提升空间,为植被恢复工程提供了可行性.但在造林实践中,需深入考量植被种间的水分竞争机制,避免新植植被与原有林分争夺有限水资源;同时,随着植被生长,生物量累积与根系扩张将加剧水分消耗,需强化原有植被抚育管理,构建动态监测体系,精准调控植被生长与水分平衡,规避长期水资源亏空风险[58],为干旱半干旱地区生态修复提供科学指引.此外,结合气象数据预测与植被生理模型,提前规划不同降水情景下的适应性管理策略,将有助于提升生态修复措施的前瞻性与灵活性,推动理论上限向现实生产力的有效转化.

4 结语

了解不同植被类型的水分利用效率(WUE)及土壤水分的植被承载力,对于科学规划区域植被建设、提高沙区水资源利用效率具有重要意义.本研究发现,不同植被类型碳水通量整体呈递增趋势(年增长速率分别为 6.42g C/m^2、5.45kg H_2O/m^2),但 WUE 随大规模植被恢复推进呈下降趋势,尤其在灌灌混交林中,种间竞争显著降低 WUE,最大降幅达 23.72%.灌木林 WUE 对环境因子变化响应敏感,CO_2 浓度为关键驱动因子,并通过气温和 NDVI 产生显著间接影响(通径系数分别为 0.435 和 0.808).目前毛乌素沙地水资源承载力已接近临界值,土壤水分植被承载力大小依次为:Ao(3900 株/hm^2)、Sv(3112 株/hm^2)、Ao(2315 株/hm^2)×Ck(415 株/hm^2)、Ao(2220 株/hm^2)×Sp(337 株/hm^2)、Sp(772 株/hm2)和 Ps(345 株/hm^2).其中,灌木纯林显示出更高的碳水调节适应性,建议优先发展灌木纯林,并根据不同物种组合的土壤水分承载上限,优化林分密度配置.为提升 WUE,应考虑间接调控 CO_2 浓度和 NDVI,可通过增加地表植被覆盖度、构建合理植被结构、限制碳排放及推广生态友好型土地利用方式等手段,增强植被对资源的利用效率与自我调节能力.整体来看,未来区域生态建设应兼顾碳水平衡与资源承载边界,避免因过度植被恢复引发水资源亏空,确保生态系统稳定性与可持续性.

参考文献:

[1] Carrer M, Castagneri D, Popa I, et al. Tree spatial patterns and stand attributes in temperate forests: The importance of plot size, sampling design, and null model [J]. Forest Ecology and Management, 2018, 407:125-134.

[2] Shi H, Zhang F, Shi Q, et al. Responses of arid plant species diversity and composition to environmental factors [J]. Journal of Forestry Research, 2023,34(6):1723-1734.

[3] Wang S, Fu B, Piao S, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes [J]. Nature Geoscience, 2016,9(1): 38-41.

[4] 郭紫晨,刘树林,康文平,等.2000~2015 年毛乌素沙区植被覆盖度变化趋势 [J]. 中国沙漠, 2018,38(5):1099-1107.
Guo Z C, Liu S L, Kang W P, et al. Change Trend of Vegetation Coverage in the Mu Us Sandy Region from 2000 to 2015 [J]. Journal of Desert Research, 2018,38(5):1099-1107.

[5] Liang P , Yang X. Landscape spatial patterns in the Maowusu (Mu Us) Sandy Land, northern China and their impact factors [J]. CATENA, 2016,145:321-333.

[6] Zhao M, Zhang J, Velicogna I, et al. Ecological restoration impact on total terrestrial water storage [J]. Nature Sustainability, 2021,4(1):56-62.

[7] Feng X, Fu B, Piao S, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits [J]. Nature Climate Change, 2016,6(11):1019-1022.

[8] 杜晓铮,赵 祥,王昊宇,等.陆地生态系统水分利用效率对气候变化的响应研究进展 [J]. 生态学报, 2018,38(23):8296-8305.
Du X Z, Zhao X, Wang H Y, et al. Responses of terrestrial ecosystem water use efficiency to climate change: a review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(23):8296-8305.

[9] Zhang T, Peng J, Liang W, et al. Spatial-temporal patterns of water use efficiency and climate controls in China's Loess Plateau during 2000~2010 [J]. Science of the Total Environment, 2016,565:105-122.

[10] 张鸿文,杜纪山,汪飞跃,等.退耕还林工程灌木林培育与利用探讨 [J]. 林业经济, 2008,(12):26-30.
Zhang H W, Du J S, Wang F Y, et al. Discussion on silviculture and utilization of the shrubs for conversion of cropland to forest [J]. Forestry Economics, 2008,(12):26-30.

[11] 郭忠升,邵明安.半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力 [J]. 生态学报, 2003,(8):1640-1647.
Guo Z S, Shao M G. Soil water carrying capacity of vegetation and soil desiccation in artificial forestry and grassland in semi-arid regions of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003,(8):1640-1647.

[12] Wang Y, Shao M. Vegetation soil water carrying capacity of artificial pasture in loess region in Northern Shaanxi, China [J]. Transactions of

the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012,28(18):134−141.

[13] 芦　琛.典型水土保持林地植被水分利用效率与承载力模型模拟研究 [D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2021.
Lu C. Research on model simulation of water use efficiency and carrying capacity of typical soiland water conservation forest land [D]. Yang Ling: Northwest A & F University, 2021.

[14] Guo Z S. Soil water carrying capacity for vegetation [J]. Land Degradation & Development, 2021,32(14):3801−3811.

[15] Jia X, Shao M, Yu D, et al. Spatial variations in soil−water carrying capacity of three typical revegetation species on the Loess Plateau, China [J]. Agriculture, ecosystems & environment, 2019,273:25−35.

[16] 张蓝霄,李雅婧,胡晓创,等.基于Biome−BGC模型的刺槐人工林生产力和内在水分利用效率研究 [J]. 林业科学研究, 2023,36(3):1−10.
Zhang L X, Li Y J, Hu X C, et al. Productivity and Intrinsic Water Use Efficiency of *Robinia pseudoacacia* Plantations based on Biome−BGC Model [J]. Forest Research, 2023,36(3):1−10.

[17] 李书恒,侯　丽,史阿荣,等.基于Biome−BGC模型及树木年轮的太白红杉林生态系统对气候变化的响应研究 [J]. 生态学报, 2018,38(20):7435−7446.
Li S H, Hou L, Shi A R, et al. Response of Larix chinensis forest ecosystem to climate change based on BiomeBGC model and tree rings [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(20):7435−7446.

[18] Huang M, Piao S, Sun Y, et al. Change in terrestrial ecosystem water-use efficiency over the last three decades [J]. Global Change Biology, 2015,21(6):2366−2378.

[19] Ma S, Churkina G, Wieland R, et al. Optimization and evaluation of the ANTHRO−BGC model for winter crops in Europe [J]. Ecological modelling, 2011,222(20−22):3662−3679.

[20] 刘秋雨.三种典型植被类型下 Biome−BGC 生态过程模型与遥感观测 LAI 的数据同化研究 [D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018.
Liu Q Y. DATA Assimilation study of Biome−BGC ecologicalprocess model and remote sensing observation laiunder three typical vegetation types [D]. Yang Ling : Northwest A & F University, 2018.

[21] 康满春,朱丽平,许　行,等.基于Biome−BGC模型的北方杨树人工林碳水通量对气候变化的响应研究 [J]. 生态学报, 2019,39(7):2378−2390.
Kang M C, Zhu L P, Xu X, et al. Modelling the responses of carbon and water fluxes with climate change for a poplar plantation in northern China based on the Biome−BGC model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(7):2378−2390.

[22] Yan F, Wu B, Wang Y. Estimating spa tiotemporal patterns of aboveground biomass using Landsat TM and MODIS images in the Mu Us Sandy Land, China [J]. Agricultural and forest meteorology, 2015,200:119−128.

[23] 曾慧卿,刘琪璟,冯宗炜,等.基于 BIOME−BGC 模型的红壤丘陵区湿地松(Pinus elliottii)人工林 GPP 和 NPP [J]. 生态学报, 2008,(11):5314−5321.
Zeng H Q, Liu Q J, Feng Z W, et al. GPP and NPP study of *Pinus elliottii* forest in red soil hilly region based on BIOME−BGC model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008,(11):5314−5321.

[24] 高　琴.毛乌素沙地典型植被土壤水分利用策略与承载力研究 [D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2024.
Gao Q. Study on soil water use strategy and carrying capacity of typical vegetation in Mu Us Sandy Land [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.

[25] Hou, Q, Pei, T, Yu, X, et al. The seasonal response of vegetation water use efficiency to temperature and precipitation in the Loess Plateau, China. Global Ecology and Conservation, 2022,33,e01984.

[26] 王云强.黄土高原地区土壤干层的空间分布与影响因素 [D]. 北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2010.
Wang Y Q. Spatial distribution and influencing factors of soil dry layer in the Loess Plateau [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Ministry of Education, 2010.

[27] Feng Z, Xing W, Wang W, et al. Assessing the spatiotemporal dynamics of water and carbon fluxes in subtropical forest of Xin′an River Basin using an improved Biome−BGC model [J]. Journal of Hydrology, 2024,635:131201.

[28] 杨梅焕,李　扬,王　涛,等.毛乌素沙地植被水分利用效率时空变化特征及其对水热条件的响应 [J]. 测绘通报, 2023,(7):44−50,79.
Yang M H, Li Y, Wang T, et al. Spatial and temporal change of water use efficiency and its response to air temperature and precipitation in the Mu Us Sandy Land [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023,(7):44−50,79.

[29] Liu Z, Wang T, Qu Y, et al. Prediction of high−quality MODIS−NPP product data [J]. Remote Sensing, 2019,11(12):1458.

[30] Keenan T F, Hollinger D Y, Bohrer G, et al. Increase in forest water−use efficiency as atmospheric carbon dioxide concentrations rise [J]. Nature, 2013,499(7458):324−327.

[31] Mu Y, Jia X, Ye Z, et al. Dry−season length affects the annual ecosystem carbon balance of a temperate semi−arid shrubland [J]. Science of The Total Environment, 2024,917:170532.

[32] 袁洪艺,杜灵通,乔成龙,等.人工灌丛总初级生产力和蒸散对气候变化的响应模拟——以宁夏盐池县荒漠草原区为例 [J]. 生态学报, 2024,44(8):3515−3524.
Yuan H Y, Du L T, Qiao C L, et al. Simulation of GPP and ET response to climate change for the planted shrub ecosystem in desert steppe area of Yanchi county, Ningxia [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(8):3515−3524.

[33] Chen J, Chen Y, Wang K, et al. Differences in soil water storage, consumption, and use efficiency of typical vegetation types and their responses to precipitation in the Loess Plateau, China [J]. Science of The Total Environment, 2023,869:161710.

[34] 马龙龙,易志远,魏采用,等.宁夏盐池县生态系统水分利用效率时空特征及其影响因素 [J]. 干旱区研究, 2024,41(4):650−660.
Ma L L, Yi Z Y, Wei Y, et al. Temporal and spatial characteristics of ecosystem water use efficiency and influencing factors in Yanchi County, Ningxia, China [J]. Arid Zone Research, 2024,41(4):650−660.

[35] 吴冠宇.基于 Biome−BGC 模型的黄土丘陵区典型林地水分利用效率研究 [J]. 地下水, 2022,44(4):104−106.
Wu G Y. Study on water use efficiency of typical forest land in loess hilly region based on Biome−BGC model [J]. Ground water, 2022,44(4):104−106.

[36] Fu J, Gong Y, Zheng W, et al. Spatial−temporal variations of terrestrial

evapotranspiration across China from 2000 to 2019 [J]. Science of the Total Environment, 2022,825:153951.

[37] You Y, Wang S, Ma Y, et al. Improved modeling of gross primary productivity of Alpine Grasslands on the Tibetan Plateau using the biome−BGC model [J]. Remote Sensing, 2019,11(11):1287.

[38] Migliavacca M, Musavi T, Mahecha M D, et al. The three major axes of terrestrial ecosystem function [J]. Nature, 2021,598(7881):468−472.

[39] Gentine P, Green J K, Guérin M, et al. Coupling between the terrestrial carbon and water cycles−a review [J]. Environmental Research Letters, 2019,14(8):083003.

[40] Jia B, Luo X, Wang L, et al. Changes in water use efficiency caused by climate change, CO_2 fertilization, and land use changes on the Tibetan Plateau [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2023,40(1):144−154.

[41] Luo X, Jia B, Lai X. Contributions of climate change, land use change and CO_2 to changes in the gross primary productivity of the Tibetan Plateau [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2020,13(1):8−15.

[42] Niu S, Xing X, Zhang Z H E, et al. Water-use efficiency in response to climate change: from leaf to ecosystem in a temperate steppe [J]. Global Change Biology, 2011,17(2):1073−1082.

[43] Overdieck D, Ziche D, Yu R D. Gas exchange of Populus euphratica leaves in a riparian zone [J]. Journal of Arid Land, 2013,5:531−541.

[44] Wang H, Li X, Xiao J, et al. Evapotranspiration components and water use efficiency from desert to alpine ecosystems in drylands [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021,298:108283.

[45] Shen W, Reynolds J F, Hui D. Responses of dryland soil respiration and soil carbon pool size to abrupt vs. gradual and individual vs. combined changes in soil temperature, precipitation, and atmospheric [CO_2]: a simulation analysis [J]. Global Change Biology, 2009,15(9): 2274−2294.

[46] Liu Y, Xiao J, Ju W, et al. Water use efficiency of China′s terrestrial ecosystems and responses to drought [J]. Scientific Reports, 2015,5(1): 13799.

[47] Jia X, Zhu Y, Luo Y. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China [J]. Journal of Hydrology, 2017,546:113−122.

[48] 茹 豪,张建军,李玉婷,等.晋西黄土高原水资源植被承载力分析及对策建议 [J]. 环境科学研究, 2015,28(6): 923−929.
Ru H, Zhang J J, Li Y T, et al. Analysis and countermeasures of the carrying capacity of water resources for vegetation on the Loess Plateau, Western Shanxi Province, China [J]. Research of Environmental Sciences, 2015,28(6):923−929.

[49] 洪光宇.毛乌素沙地杨柴和沙柳的蒸腾耗水特征及人工林地植被承载力 [D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2021.
Hong G Y. Characteristics of transpiration water consumption of *Hedysarum mongolicum* and *Salix psammophila* in Mu Us Sandy Land and vegetation carrying capacity of artificial forest land [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.

[50] 苗雅洁.毛不拉孔兑穿越沙漠段人工植被蒸腾耗水特征及承载力研究 [D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2023.
Miao Y J. Study on the characteristics of transpiration water consumption and carrying capacity of artificial vegetation in the desert section of Maobulakongdui [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.

[51] Xia Y Q, Shao M A. Soil water carrying capacity for vegetation: a hydrologic and biogeochemical process model solution [J]. Ecological Modelling, 2008,214(2−4):112−124.

[52] 张建军,贺 维,纳 磊.黄土区刺槐和油松水土保持林合理密度的研究 [J]. 中国水土保持科学, 2007,24(2):55−59.
Zhang J J, He W, Na W. Study on appropriate density of *Pinus tabulaeformis* and *Robinia Pseudoacacia* for soil and water conservation forests in Loess area [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007,24(2):55−59.

[53] Yang G, Pu R, Zhang J, et al. Remote sensing of seasonal variability of fractional vegetation cover and its object−based spatial pattern analysis over mountain areas [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013,77:79−93.

[54] Yu P, Wang Y, Du A, et al. The effect of site conditions on flow after forestation in a dryland region of China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013,178(4):66−74.

[55] Li, Y, Zhang, B, Shao, R, et al. Estimating the maximum vegetation coverage and productivity capacity supported by rainwater resources on the Loess Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2023,619,129346.

[56] Li, R, Hou, X, Jia, Z, et al. Effects on soil temperature, moisture, and maize yield of cultivation with ridge and furrow mulching in the rainfed area of the Loess Plateau, China [J]. Agricultural Water Management, 2013,116:101−109.

[57] Song, X, Wu, P, Gao, X, et al. Rainwater collection and infiltration (RWCI) systems promote deep soil water and organic carbon restoration in water−limited Sloping orchards [J]. Agricultural Water Management, 2020,242:106400.

[58] Gao Q, Dang X, Meng Z, et al. Effects of drought on the water use strategies of pure and mixed shrubs in the Mu Us Sandy Land [J]. Plants, 2024,13(23):3261.

致谢：本实验野外监测采样工作由鄂尔多斯市林业和草原事业发展中心、沙地生物资源保护与培育国家林业和草原局重点实验室支持配合,在此表示感谢.

作者简介：高 琴(1998−),女,陕西榆林人,硕士研究生,主要从事荒漠化防治工作.发表论文 4 篇.gaoqin0823@126.com.