

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.09.021

引用格式:王艺凌,马维伟,常文华,等.短期氮磷添加对尕斯库勒沼泽草甸土壤化学计量特征的影响[J].草地学报,2026,34(9):3374-3384

WANG Yi-ling, MA Wei-wei, CHANG Wen-hua, et al. Short-term Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Stoichiometric Characteristics in a Swamp Meadow at Gahai[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(9):3374-3384

短期氮磷添加对尕斯库勒沼泽草甸土壤化学计量特征的影响

王艺凌¹, 马维伟^{1,2*}, 常文华¹, 安娜¹, 常佳晨¹, 王依秋¹

(1. 甘肃农业大学林学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃尕斯库勒湿地生态系统定位观测与研究站, 甘肃 甘南 747200)

摘要:为探究青藏高原高寒湿地土壤碳氮磷含量及其化学计量特征对氮磷添加的响应。本研究以尕斯库勒沼泽草甸为研究对象,通过野外控制实验设置对照(CK)、氮添加(N)、磷添加(P)、氮磷添加(NP)四种处理,探究0~40 cm土层土壤养分含量及其化学计量特征对连续3年氮磷添加的响应规律。结果表明:氮、磷和氮磷添加降低土壤pH、容重、含水量和铵态氮含量,而增加地上生物量;且仅氮添加增加硝态氮含量。不同添加处理均降低土壤有机碳、C:N,而增加全氮、N:P;氮、磷单独添加显著增加全磷含量而降低C:P,而氮磷添加下均无显著变化。相关分析显示,C:N与全氮、N:P呈极显著负相关;C:P与有机碳、N:P,及N:P与全氮呈显著正相关;土壤全氮是驱动土壤化学计量特征变化的主要因子;效应分析表明,不同添加处理全氮、N:P均呈正效应。综上,氮磷添加对土壤碳氮磷存在显著影响,为预测高寒湿地生态系统对气候环境变化的响应及制定保护策略提供参考。

关键词:氮磷添加;沼泽草甸;尕斯库勒湿地;土壤化学计量特征

中图分类号:S812.2

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)09-3374-11

Short-term Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Stoichiometric Characteristics in a Swamp Meadow at Gahai

WANG Yi-ling¹, MA Wei-wei^{1,2*}, CHANG Wen-hua¹, AN Na¹, CHANG Jia-chen¹, WANG Yi-qiu¹

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu Province 730070, China;

2. Gansu Gahai Wetland Ecosystem Positioning Observation and Research Station, Gannan, Gansu Province 747200, China)

Abstract: To investigate the responses of soil carbon, nitrogen, and phosphorus content and their stoichiometric characteristics in alpine wetlands of the Qinghai-Tibet Plateau to nitrogen and phosphorus addition, this study took the Gahai swamp meadow as the research subject. Through field manipulation experiments, four treatments were established: control (CK), nitrogen addition (N), phosphorus addition (P), and combined nitrogen-phosphorus addition (NP). The research explored the response patterns of soil nutrient contents and their stoichiometric characteristics in the 0~40 cm soil layer to three consecutive years of nitrogen and phosphorus addition. Results indicated that nitrogen, phosphorus, and combined nitrogen-phosphorus applications reduced soil pH, bulk density, soil water content, and ammonium nitrogen content while increasing aboveground biomass. Nitrogen application alone increased nitrate nitrogen content. All treatments reduced soil organic carbon and C:N ratios while increasing total nitrogen and N:P ratios. Individual nitrogen and phosphorus addition significantly increased total phosphorus content and decreased C:P ratios, whereas the combined addition of nitrogen-phosphorus showed no significant changes in these parameters. Correlation analysis

收稿日期:2025-09-28;修回日期:2025-11-03

基金项目:甘肃省2024年度重点人才项目(2024RCXM82);甘肃省教育厅:产业支撑计划项目(2025CYZC-042);甘肃省拔尖领军人才项目(GSBJLJ-2023-09);中央引导地方科技发展资金项目(24ZYQA023);甘肃省财政专项项目(GSCZZ-20160909)资助;甘肃农业大学研究生联合培养基地(GAU2024-005);2026甘肃省高校研究生“创新之星”(2026CXZC-793)资助

作者简介:王艺凌(2002-),女,土家族,湖北恩施人,硕士研究生,主要从事湿地碳氮循环过程研究,E-mail:1073324020234@st.gsau.edu.cn;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail:mww-007@163.com

revealed highly significant negative correlations between C:N and total nitrogen, as well as N:P; significant positive correlations existed between C:P and organic carbon, N:P, and between N:P and total nitrogen. Soil total nitrogen emerged as the primary driver of changes in soil stoichiometric characteristics. Effect analysis indicated positive effects of different nutrient additions on both total nitrogen and N:P ratios. In summary, nitrogen and phosphorus additions exerted significant effects on soil carbon, nitrogen, and phosphorus, providing insights for predicting responses of alpine wetland ecosystems to climatic and environmental changes and formulating conservation strategies.

Key words: Nitrogen and phosphorus addition; Swamp meadow; Gahai wetland; Soil stoichiometric characteristics

土壤是湿地植物生长发育所需营养的主要供给源,也是陆地生态系统的重要组成部分。它兼具多重生态功能,对湿地生态系统功能的形成与维持具有十分重要的作用。土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)、全氮(Total nitrogen, TN)、全磷(Total phosphorus, TP)在维系生态系统物质循环与能量流动过程中具有关键作用^[1]。碳(Carbon, C)是植物进行光合作用的产物;氮(Nitrogen, N)作为关键性元素,参与调节植被生产力、群落结构及其多样性^[2];磷(Phosphorus, P)能够影响植被生长及其产量,参与植物能量传递、物质合成和信号传递等^[3]。这些元素的化学计量特征是反映土壤肥力和质量的重要参数^[4]。其中,C:N是土壤有机质分解和积累能力的重要标志^[5],土壤C:P是衡量磷有效性的指标之一^[6],N:P反映土壤肥沃程度,影响养分的生物利用有效性^[7]。因此,化学计量特征指示着土壤有机物的分解速率和矿化过程^[4]。对养分循环、生态系统生产力具有重要调控作用^[8]。研究高寒湿地土壤碳氮磷含量及其化学计量特征对养分输入的响应,有助于深入理解环境变化下高寒湿地土壤生态系统中元素循环及耦合关系,为维护高寒生态系统健康、推动其科学管理提供理论支撑。

土壤碳氮磷含量及其化学计量特征对养分输入响应敏感,其变化影响着生态系统的生产力、养分循环和可持续性^[9]。研究表明,施氮通常增加土壤N含量和N:P^[10],但对SOC、TP的影响结果表现出差异性^[11]。例如,李焕茹等^[12]研究认为,长期氮添加会提高微生物活性,加速有机质分解,从而导致SOC含量下降;而Wang等^[13]则研究认为施氮可使有机养分的输入与有机养分的分解之间达到平衡,从而对土壤有机碳含量无显著影响。这种差异可能与生态系统的初始养分状况、氮添加强度与持续时间等因素有关^[9]。在磷添加方面,有研究显示其虽能显著增加土壤P的有效性,但对土壤C、N含量无显著影响^[14];黄土高原地区的研究进一步表明^[15],磷添加显著降低 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N含量,而对

TN含量无显著影响;然而在荒漠草原生态系统中^[10],磷添加则显著增加了TP和SOC含量,反映出不同生态系统对磷输入的响应具有差异性。目前,国内关于氮磷添加对土壤碳氮磷含量及土壤性质影响的研究结果尚不统一。有研究表明,氮磷输入缓解了土壤养分限制,促进植物生长^[16],从而推动碳向土壤的输入^[17];但在温带草原区^[18],长期氮磷添加并未对土壤的总碳、总氮及总磷含量产生显著影响;另有研究显示,在内蒙古典型草原区^[19],氮磷添加仅显著增加TP含量,而对SOC、TN含量无显著影响。因此,有必要在更多类型的生态系统中深入讨论氮磷添加对土壤养分含量及其化学计量特征的影响,尤其需关注氮磷同时添加可能产生的复杂交互作用,这种作用可能不同于单一养分添加的效应^[9]。特别是在青藏高原高寒沼泽草甸生态系统中,目前尚不清楚氮磷添加将如何影响土壤碳氮磷含量及其化学计量特征,亟待进一步研究予以明确。

尕海沼泽草甸区位于青藏高原东北部,是青藏高原高寒湿地重要组成部分之一,面积约为51 160 hm^2 ,对全球气候变化和人类活动响应敏感^[20]。然而,近几十年来,受气候变化和人为活动的影响,青藏高原正经历氮沉降持续增加,近年来氮沉降量约为8~10 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,预计未来沉降速率可能增至当前的2~3倍^[21],持续增加的大气氮沉降致使土壤中氮、磷比例失调,增加的氮无法与土壤中可利用的磷相平衡^[22],从而加剧磷限制,影响高寒生态系统功能和养分循环^[23-24]。而目前对于氮磷共同添加对高寒湿地土壤碳氮磷含量及其化学计量比的影响研究相对薄弱,土壤碳氮磷含量及其化学计量比对氮、磷输入的响应机制仍不清楚,其动态变化过程尚缺乏系统研究。因此,本研究选取尕海湿地区典型沼泽草甸为研究对象,采用野外控制的实验方法,探讨氮、磷添加的第3年土壤碳氮磷含量及其化学计量特征的变化规律,解析影响土壤化学计量变化的关键因子。研究结果将为未来氮磷沉降加剧

背景下高寒湿地生态系统土壤养分循环过程研究提供重要数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省甘南藏族自治州碌曲县尕海自然保护区(33°58'12"~34°32'16"N, 102°05'00"~102°47'39"E), 该湿地是青藏高原高寒湿地的重要组成部分。海拔在3430~4500 m之间, 属青藏高原气候带高寒湿润气候区, 年平均气温约为1.2℃(最冷月1月平均气温为-9.1℃, 最热月7月份平均气温为13.7℃); 年平均降水量约为780 mm, 7—9月降水量占年总降水量的80%以上, 年平均蒸发量为1150.5 mm。据第二次湿地资源调查显示, 尕海湿地面积57 846 hm², 其中沼泽草甸面积为51 160 hm², 占湿地总面积约88.4%。土壤类型包括暗色草甸土、泥炭土和沼泽土等。植被以多年生草本植物为主, 主要有藏蒿草(*Kobresia tibetica*)、兰石草(*Lancea tibetica*)、青藏苔草(*Carex moorcroftii*)、早熟禾(*Poa annua*)和冷蒿(*Artemisia frigida*)等^[25]。

1.2 试验设计

氮磷控制试验始于2021年5月, 在尕海湿地区的典型沼泽草甸区域, 随机选取植被生长一致且覆盖度超过85%的区域, 采用野外控制试验的方法, 以自然生长小区作为对照(CK, 0 kg·hm⁻²·a⁻¹+0 kg·hm⁻²·a⁻¹), 并且布设氮添加(N, 20 kg·hm⁻²·a⁻¹)、磷添加(P, 10 kg·hm⁻²·a⁻¹)和氮磷添加(NP, 20 kg·hm⁻²·a⁻¹+10 kg·hm⁻²·a⁻¹)处理, 每种处理均设置3次重复, 共计12个试验小区, 各小区面积为2.25 m², 间隔5 m以上(图1)。其中, 氮添加量基于青藏高原氮沉降背景值(10 kg·hm⁻²·a⁻¹)的2倍(约为20 kg·hm⁻²·a⁻¹)进行添加^[21]; 考虑到该区磷外源输入较小, 磷添加设置为氮沉降的一半, 即10 kg·hm⁻²·a⁻¹。为了便于植物更好地吸收和模拟氮沉降, 结合该区前人研究, 本研究选择的添加材料为硝酸铵(NH₄NO₃)^[26]和磷酸二氢钠(NaH₂PO₄)^[27]。在每年的5、7、9月中旬按1:1:1的比例溶于2 L水中进行施用。研究样地示意图见图1。

1.3 样品采集

在2023年6月(植物生长初期)、8月(植物生长盛期)、10月(植物生长末期)进行土壤采样。在上述不

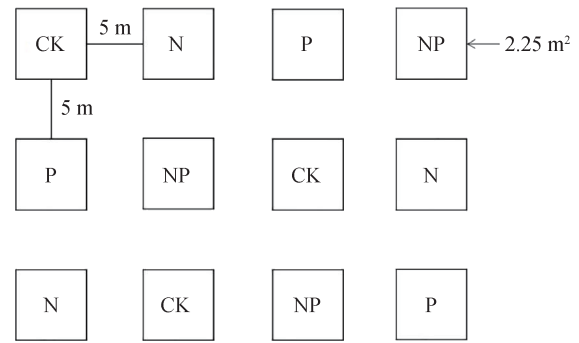


图1 样地示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the sample plots

注: CK为对照处理; N为氮添加处理; P为磷添加处理; NP为氮磷添加处理

Note: CK represents the control treatment; N stands for nitrogen addition; P for phosphorus addition; and NP for combined nitrogen and phosphorus addition

同添加处理的试验小区内, 采用直径5 cm土钻, 按照五点取样法分别采集0~10 cm, 10~20 cm, 20~40 cm土层的土壤样品, 将同一样方内同一土层的样点土样混匀作为1个土壤样品, 各试验处理均设置3次重复。采集好的新鲜土壤样品过2 mm筛, 除去碎屑、动植物残体和砾石等杂物, 平均分为2份, 一部分环刀原状样品土样用于测定土壤含水量、容重、硝态氮和铵态氮; 另一部分自然风干后用于土壤有机碳、全氮、全磷含量和pH值测定, 用剪刀将样方内所有地上植物齐地面刈割, 用于测定地上生物量。

1.4 土壤理化性质的测定方法

土壤pH采用电位法(水土比为2.5:1)测定; 土壤容重(Bulk density, BD)用环刀法测定; 土壤含水量(Soil water content, SWC)采用烘干法测定; 土壤硝态氮(Nitrate nitrogen, NO₃⁻-N)与铵态氮(Ammonium nitrogen, NH₄⁺-N)含量采用MgO-代氏合金蒸馏法测定^[26]; 地上生物量(Aboveground biomass, AB)采用全收获法进行测定^[28]; 土壤有机碳(SOC)含量采用油浴加热、重铬酸钾氧化-浓硫酸容量法测定; 土壤全氮(TN)采用硫酸高温消解后用凯氏定氮仪测定; 土壤全磷(TP)采用钼锑抗比色法进行测定^[10]。

1.5 效应量选择及计算

采用响应比(Response Rate, RR)作为统计学指标, 响应比的对数(ln RR)作为效应量来研究氮磷添加对高寒湿地生态系统土壤养分含量及其化学特征的影响。ln RR计算公式如下^[29-30]:

$$\ln RR = \ln(\bar{X}_T / \bar{X}_C) = \ln(\bar{X}_T) - \ln(\bar{X}_C)$$

式中, $\bar{X}_T$ 和 $\bar{X}_C$ 分别为试验组和对照组响应因子的平均值。

1.6 数据统计与分析

利用 SPSS 26.0 软件对原始数据进行分析, 对不同土层、不同处理下土壤各项指标进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和 Duncan 法分析检验差异显著性($\alpha=0.05$); 对不同处理、土层深度及其交互作用对土壤养分含量及化学计量特征的影响进行双因素方差分析(Two-way ANOVA); 利用 Pearson 法分析土壤化学计量特征与理化因子之间的相互关系; 利用 Canoco 5.0 对土壤化学计量特征和理化因子进行冗余分析; 利用 R 4.5.1 软件中的“metafor”软件包计算效应量。使用 Origin 2021 软件进行绘图。本文对 6, 8, 10 三个月份数据的算术

平均值进行计算, 0~40 cm 土层指标数值是基于各土层厚度比例的加权平均得出, 图表中数据均为平均值±标准误(Mean±SE)。

2 结果与分析

2.1 土壤理化指标

如表 1 所示, 与对照相比, N, P, NP 添加导致 pH 和 BD 分别显著降低了 5.28%, 4.10%, 4.36% 和 32.71%, 10.28%, 28.04%; P, NP 添加显著降低了 SWC 含量, 分别降低了 6.34%, 9.67%; N 添加显著增加了 NO_3^- -N 含量 12.17%, 而 NP 添加显著降低了 NO_3^- -N 含量 34.81%; P, NP 添加使 NH_4^+ -N 含量分别显著降低了 20.75%, 25.94%; N, P, NP 添加显著增加了 AB 含量, 分别增加了 13.82%, 3.42%, 10.35%。

表 1 氮磷添加下 0~40 cm 土层土壤基本性质与地上生物量

Table 1 Soil physicochemical indexes in 0-40 cm soil layer under nitrogen and phosphorus addition

处理 Treatment	酸碱度 pH	容重 BD/(g·kg ⁻¹)	含水量 SWC/%	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/(mg·kg ⁻¹)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/(mg·kg ⁻¹)	地上生物量 AB/(g·m ⁻²)
CK	7.57±0.63 ^a	1.07±0.01 ^a	33.91±0.30 ^a	18.07±0.40 ^b	2.12±0.01 ^a	335.54±14.87 ^c
N	7.17±0.41 ^c	0.72±0.04 ^c	33.05±0.70 ^a	20.27±0.94 ^a	2.07±0.07 ^a	381.92±14.59 ^a
P	7.26±0.24 ^b	0.96±0.01 ^b	31.76±0.51 ^b	16.34±1.51 ^b	1.68±0.09 ^b	347.01±10.44 ^{bc}
NP	7.24±0.27 ^{bc}	0.77±0.03 ^c	30.63±0.07 ^c	11.78±1.08 ^c	1.57±0.17 ^b	370.26±12.70 ^{ab}

注: 不同处理间显著差异用小写字母表示($P<0.05$)。下同

Note: Significant differences between treatments are indicated by lowercase letters ($P<0.05$). The same as below

2.2 土壤碳氮磷含量及其化学计量特征

不同添加处理下 SOC, TN, TP 含量存在显著差异($P<0.05$, 图 2)。不同添加处理下沼泽草甸 SOC, TN, TP 含量分别在 20.98~42.87, 0.66~2.49, 0.57~0.91 g·kg⁻¹ 之间。在 0~40 cm 土层, 与对照相比, N, P, NP 添加均显著降低 SOC 含量, N 添加下 SOC 含量最低, 降低了 17.67%, 在 0~10 cm 土层, N, P, NP 添加均增加 SOC 含量, 而在 10~20 cm 和 20~40 cm 土层下各添加均降低 SOC 含量; N, P, NP 添加均显著增加 TN 含量, P 添加下 TN 含量最高, 增加了 88.98%; N, P 添加均显著增加 TP 含量, 分别增加 11.55%, 22.61%, 而 NP 添加下 TP 含量变化不显著。处理和土层的交互作用对 SOC 和 TN 含量具有显著影响, 而对 TP 含量影响不显著。同时, SOC, TN, TP 含量均随土层深度增加而降低, 表现出明显的土壤养分表聚性。

不同添加处理和土层对 C:N, C:P, N:P 具有显

著影响($P<0.05$, 图 2)。不同添加处理下 C:N, C:P, N:P 变化范围分别在 17.34~46.36, 31.07~57.45, 1.08~2.74 之间。在 0~40 cm 土层下, 与对照相比, N, P, NP 添加均显著降低 C:N, 分别降低了 47.12%, 51.00%, 40.97%; N, P 添加均显著降低 C:P, 分别降低了 26.34%, 24.39%, 而 NP 添加下 C:P 变化不显著, 且仅在 0~10 cm 土层下, NP 添加增加 C:P, 增加了 14.25%; N, P, NP 添加均显著增加 N:P, NP 添加下 N:P 最高, 增加了 61.47%。处理和土层的交互作用对 C:N, C:P, N:P 均具有显著影响。

2.3 土壤碳氮磷含量及化学计量特征与土壤理化性质的关系

通过对土壤理化性质及其化学计量特征进行 Pearson 相关性分析发现(图 3), SOC 与 SWC, NO_3^- -N 呈显著正相关; TN 与 SWC 呈极显著正相

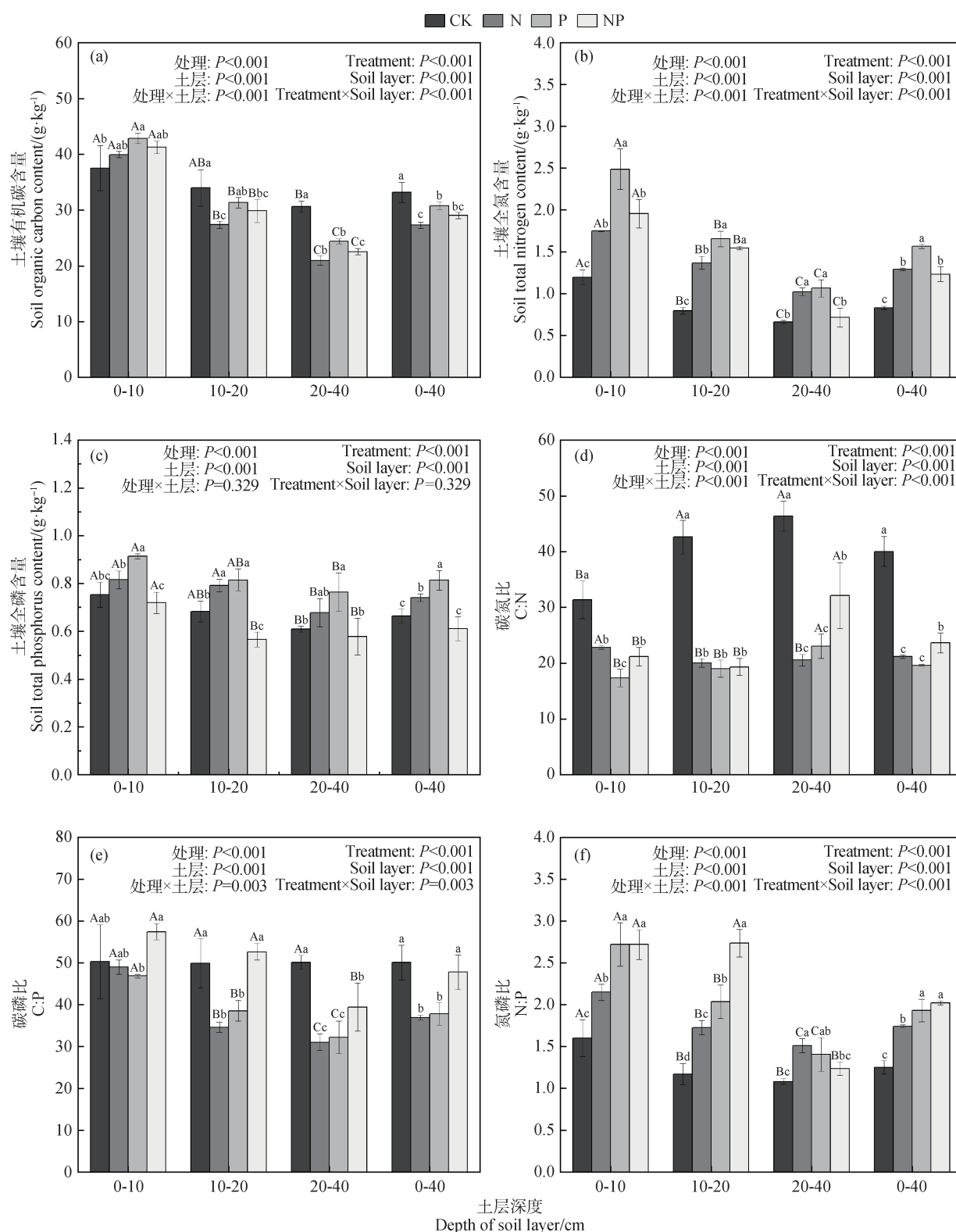


图 2 氮磷添加对土壤碳氮磷含量及其化学计量特征的影响

Fig. 2 Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil C, N, P content and their stoichiometric characteristics

注:不同大写字母表示土层间差异显著 ($P < 0.05$),不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Note: Significant differences among soil layers are indicated by uppercase letters ($P < 0.05$), Significant differences between treatments are indicated by lowercase letters ($P < 0.05$)

关,与pH呈极显著负相关;TP与SWC,NO₃⁻-N呈极显著正相关,与pH呈显著负相关;C:N与TN呈极显著负相关,与pH,BD呈极显著正相关;C:P与

SOC,SWC呈极显著正相关;N:P与TN,SWC呈显著正相关,与pH,BD呈显著负相关。

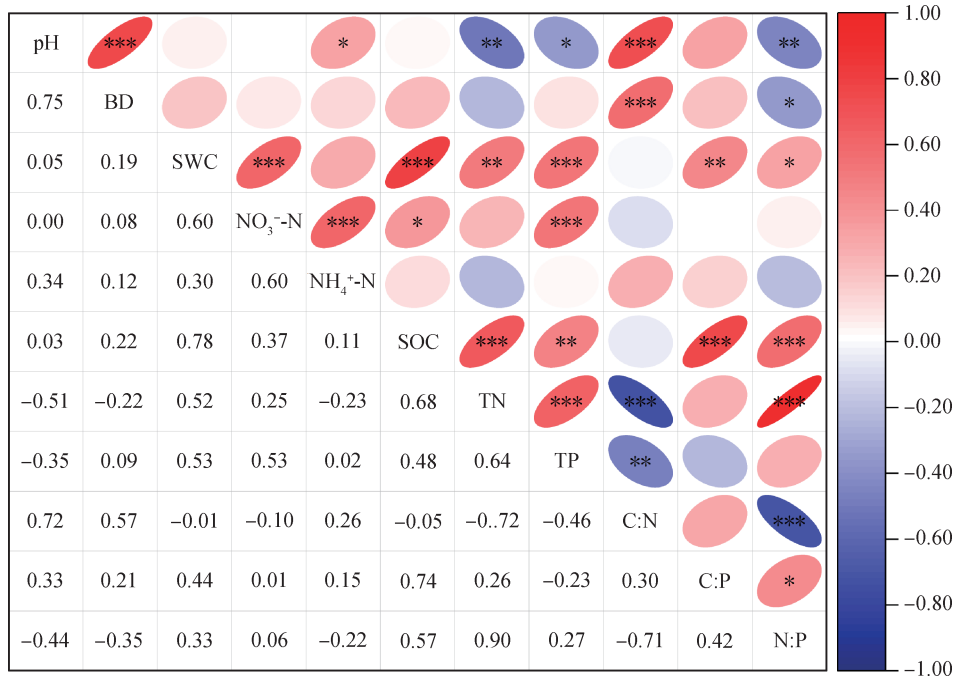


图 3 氮磷添加土壤碳氮磷含量及化学计量特征与理化性质的 Pearson 相关性

Fig. 3 Pearson correlation between nitrogen and phosphorus addition, soil C, N, and P content, stoichiometric characteristics, and physicochemical properties

注:*表示 $P \leq 0.05$, **表示 $P \leq 0.01$, ***表示 $P \leq 0.001$

Note: * indicates $P \leq 0.05$, ** indicates $P \leq 0.01$, *** indicates $P \leq 0.001$

对土壤化学计量特征与土壤理化因子进行 RDA 二维排序(图 4),第 1,2 排序轴的解释贡献度分别为 54.24%,41.17%,前两轴中的总方差解释度为 95.41%,表明前两轴能够较好地反映土壤化学计量特征与理化因子的关系,且主要由第 1 排序轴决定。由表 2 可知,各理化因子对土壤化学计量特征的影响重要性排序从大到小依次为 TN,SOC,TP,NH₄⁺-N,SWC,NO₃⁻-N,BD,pH,而 TN 对响应变量的解释量为 47.0%,即表明 TN 是驱动响应变量变异的核心因子。

不同添加处理对土壤碳氮磷含量及化学计量比的效应值如图 5 所示。在不同添加处理下,SOC,C:N 的响应比均小于 0,表现出负效应;N,P 添加下 TN,TP 和 N:P 均增加,P 添加下的 TN,TP 和 N:P 较 N 添加下分别提高 43.95%,85.51% 和 30.24%。其中,N 添加下,SOC 的效应值达到最低;P 添加下,TN 的效应值达到最高,C:N 的效应值达到最低;NP 添加下 N:P 的效应值达到最高,而对 TP,C:P 含量的提升无显著影响。

3 讨论

3.1 土壤理化性质对氮磷添加的响应

土壤 pH 是判断土壤养分有效性的重要指标,参与大部分化学反应过程,其值取决于土壤水溶液中 H⁺ 与 OH⁻ 的浓度。本研究发现,N,P,NP 添加均显著降低土壤 pH,这与大多数研究结果一致^[31-32],外源 NP 添加通过硝化作用增加了土壤 H⁺ 浓度,从而导致土壤酸化。土壤容重作为土壤物理性质的核心指标,可以反映土壤养分储存和运输能力。本研究中,N,P,NP 添加均降低 BD 和 SWC 含量,植物根系表现出的趋肥性,使得施肥区域附近的根系分布更为密集^[31],形成了更多根系孔隙,而根系密度和深度增加,需要吸收更多土壤水分。土壤 NO₃⁻-N 与 NH₄⁺-N 是有机氮通过矿化作用形成的,是植物和微生物的主要利用形态^[33],对养分添加的响应比 TN 含量更敏感,可以直观地反映土壤氮素的供需情况^[34]。本研究中 N 添加提高了 TN 和 NO₃⁻-N 含量,但对 NH₄⁺-N 含量影响不显著,一方

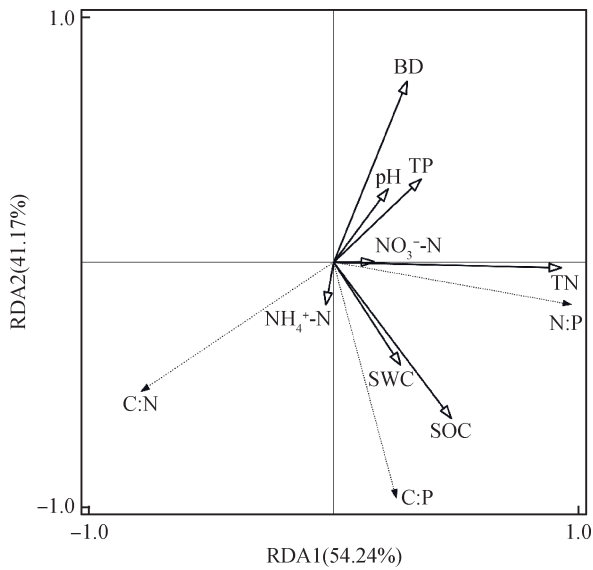


图 4 土壤碳氮磷含量及化学计量特征与理化因子的冗余分析
Fig. 4 Redundancy analysis of soil C, N, P content and stoichiometric characteristics with physicochemical factors

注:实线表示解释变量;虚线表示响应变量;箭头长短表示影响程度;箭头间夹角表示相关程度

Note: Solid lines denote explanatory variables; dashed lines denote response variables; arrow length indicates degree of influence; the angle between arrows indicates degree of correlation

表 2 土壤理化因子解释量

Table 2 Interpretation of soil physical and chemical factors

环境因子 Environmental factor	解释量 Explanation/ %	贡献值 Contribution/ %	F 值 Pseudo-F	P 值 P value
TN	47.0	49.2	30.1	0.002**
SOC	32.0	33.5	50.1	0.002**
TP	16.1	16.9	104.0	0.002**
NH ₄ ⁺ -N	0.3	0.3	2.1	0.132
SWC	<0.1	<0.1	0.4	0.634
NO ₃ ⁻ -N	<0.1	<0.1	0.2	0.732
BD	<0.1	<0.1	0.2	0.774
pH	<0.1	<0.1	<0.1	0.906

注:**表示 $P \leq 0.01$

Note: ** indicates $P \leq 0.01$

面可能是在氮素循环过程中,外源氮输入带来的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 超出植物吸收和微生物的需求量时,多余部分会通过硝化作用转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$;另一方面可能是 N 添加促进了土壤氮素矿化和硝化过程^[35],使得更多的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在土壤中积累。NP 添加均显著降低 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量,一方面,氮磷配施通过协同作用促进植物生长,显著提升了根系对 NO_3^- 和 NH_4^+ 的吸收效率,尤其是湿地植物在养分均衡时,能快速同化这两种无机氮形态;另一方面,P 添加能够改变植物对氮的吸收和利用效率,进而影响

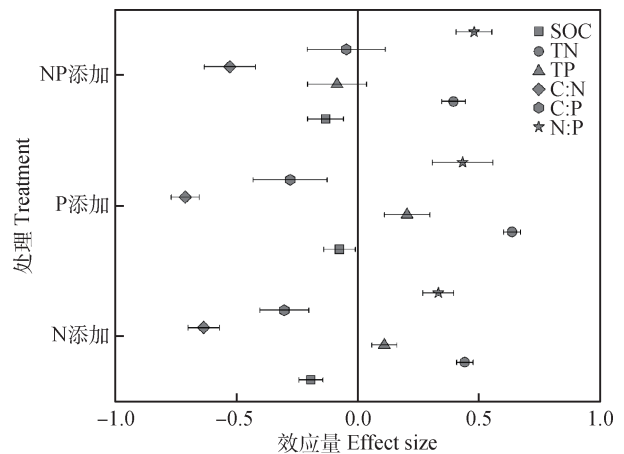


图 5 氮磷添加影响土壤碳氮磷含量及化学计量特征效应量
Fig. 5 Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil C, N, P content and stoichiometric characteristics

土壤中氮的形态和可用性^[36],并降低氮素的有效性和生物可利用性,从而导致土壤中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的含量减少。

3.2 土壤 C, N, P 含量对氮磷添加的响应

土壤 C 主要来源于植被枯落物及根系^[37],进入土壤中的有机质数量及其腐蚀腐化系数的大小可以反映 SOC 含量^[38]。本研究发现,在 0~40 cm 土层,N,P,NP 添加均降低了土壤 SOC 含量(图 2a),这与 Luo 等^[39]和 Li 等^[40]的研究一致,其原因在于氮磷养分的输入,在一定程度上提高了土壤微生物的活性和代谢速率,导致土壤分解反应加剧^[41],加速了有机质的分解,使得大量原生 SOC 以 CO_2 形式流失,其强烈的分解作用超过了植物生长增加所带来的碳输入,从而导致 SOC 的下降。且 N,NP 添加下 SOC 含量低于单独 P 添加,这可能是由于氮素对微生物分解过程的刺激作用远强于磷素,施氮会改变土壤环境,影响矿物质与碳的结合形态,并削弱矿物对有机质的吸附及保护能力,使原本被保护的有机碳更易于被微生物分解^[42],从而降低了土壤 SOC 含量。即在未来氮沉降背景下,若不配施磷肥,可能会对土壤碳库特别是深层土壤碳库构成严重威胁,不利于土壤固碳。

N 素多数源于大气氮沉降、生物固氮作用以及有机质矿化^[43-44]。本研究中,在 0~40 cm 土层,N,P,NP 添加均增加土壤 TN 含量(图 2b),这与向雪梅等^[45]的研究结果一致,一方面由于施加的 NH_3NO_4 直接增加土壤无机氮(NH_4^+ 、 NO_3^-),植物和微生物优先吸收外源 NH_4^+ 和 NO_3^- ,一定程度上

减少了对土壤原有氮素的消耗,导致TN上升;另一方面土壤水分作为氮素溶解的媒介,影响TN含量^[46],而本研究中发现不同添加处理下SWC均降低(表1),进一步减缓了氮素的迁移和淋溶损失。此外,P添加增加了土壤氮素含量,而N添加只有在与P配合施用时才更有利于土壤氮素积累,表明土壤氮库对磷的敏感性高于对氮的敏感性,有两种可能的机制可以解释这种模式:第一,过去几十年的氮沉降可能为该地区的植物生长提供了足够的氮素;第二,P添加促进了土壤氮素的积累,表明该地区植物生长受磷元素限制,这与前人研究一致^[45]。而磷是固氮微生物活性的关键限制因子,P添加降低了 NH_4^+ -N含量(表1),表明磷的输入强化了微生物与植物对矿质氮的生物固持作用,使其转化为稳定的有机氮形态。

P主要来源于原生矿物的风化^[47],土壤母质中的磷也是土壤磷素的主要来源^[48-49]。本研究发现,N,P添加均增加土壤TP含量(图2c),这与翟珈莹^[35]的研究结果相似,N,P添加直接从外源上增加了土壤磷素的供给,且N、P添加增加了植被地上生物量,有机残体输入量的增加使土壤分解反应加剧,有机质分解也可以增加部分土壤磷含量。P添加下土壤TP含量高于N添加,主要是由于P添加通过逐步饱和土壤吸附位点降低固磷能力,缓解了磷有效性不足,且磷肥当季利用率低^[3],大部分将残留在土壤中,磷易被固存形成难溶化合物而不易流失。N添加也能小幅提升TP,可能是氮素能促进磷的矿化或植物对磷的吸收。NP添加下TP含量变化不显著,可能是由于NP共同添加极大地刺激了植物和微生物的生长,对磷的吸收和利用速率超过了磷的添加速率,导致土壤中的净储量没有显著变化。

不同添加处理下,SOC,TN,TP含量在各土层间的差异显著(图2),且均随土层深度增加呈递减趋势,表明土壤中的营养元素主要富集于表层,而在不同区域、生态系统类型均发现了碳、氮分布具有表聚性^[50]。不同添加处理下,SOC与TN含量随土层深度的增加而降低,与翟珈莹^[35]的研究结果一致,这可能是因为土壤碳、氮主要来源于凋落物分解、植物残体输入及施肥,随着土层深度增加,有机质的输入能力逐渐减弱,导致土壤养分含量呈递减趋势。在不同添加处理下,TP含量虽随土层深度的增加有降低趋势,但逐层变化不显著,且下降速

率慢于SOC和TN,这或许是由于磷素在土壤中易被固定,移动性较差,不易随下渗水流淋失,所以更易在土壤中累积下来^[2]。

3.3 土壤化学计量特征对氮磷添加的响应

土壤碳、氮、磷化学计量比可以判断土壤元素的限制情况,也可以作为衡量土壤养分平衡的指标。土壤中C:N可以反映土壤中有机的分解速率,且与有机质的分解速率成反比^[9]。本研究发现,土壤C:N的变化范围为17.34~46.36,平均值为26.11,远高于我国平均值11.9,表明土壤有机质处于“高碳低氮”状态,导致微生物分解活动受到强烈抑制,有机质矿化速率缓慢。N,P,NP添加均显著降低土壤C:N(图2d),即土壤有机质质量更高、更易被分解,会进一步加速SOC的矿化,导致长期的碳损失,亟需通过合理的养分管理来打破这种生态功能失衡状态。SOC与TN之间呈显著正相关(图3),说明SOC与TN在二者元素之间存在较强的耦合性,对相同环境因子的响应是同步的,这与农田生态系统^[51]和森林生态系统^[52]研究一致。

土壤中C:P可以反映磷元素的有效性,衡量磷元素矿化能力的强弱,较低的C:P表示研究区土壤磷元素的有效性较高^[10],土壤C:P与SOC呈极显著正相关(图3),即土壤C:P大小主要由SOC含量大小决定。在杂海沼泽草甸区土壤C:P的变化范围为31.07~57.45,平均值为43.15,远低于我国平均值61,表明该土壤系统中磷元素相对富集,磷矿化潜力较强。N,P添加均显著降低土壤C:P,而NP添加下C:P无显著变化(图2e),说明单一养分的添加,打破了原有碳磷平衡,氮磷同步输入使土壤氮磷比例更适配植物和微生物需求,避免了单一养分过量引发的单向循环失衡,即氮磷施肥更符合高寒沼泽草甸土壤的碳磷循环特性,能在提升养分有效性的同时,维持碳磷平衡,减少生态功能损耗。

土壤N:P可以反映氮素是否饱和,是确定养分限制的阈值^[53]。有研究表明,N:P<10区域植物生长受氮素限制,N:P>20则表明区域植物生长受磷素限制,N:P介于10~20则受两种元素共同限制^[54]。本研究发现该区域土壤N:P的比值变化范围为1.08~2.74,平均值为1.73,远低于我国平均值5.2,且远低于植物生长受磷素限制的临界值(N:P>20),甚至低于氮素限制的临界值(N:P<10),表明该生态系统受到强烈的氮素供应限制。且N,

P, NP添加下土壤N:P的比值均增加(图2f),其中土壤N:P与TN含量呈极显著正相关(图3),说明氮输入是驱动土壤N:P变化的主要因素。尽管各添加处理均在一定程度上缓解了氮限制,但处理后的N:P值仍远低于共同限制的阈值下限,证明该区域的氮限制程度较深,而P添加下N:P显著增加了54.23%,NP添加下N:P显著增加61.47%(图2f),即P添加促进了氮素的利用效率,NP共同添加提高了土壤中可利用氮的供应,有助于缓解生态系统中的氮限制,从而促进植物生长与生态系统生产力的提升。

4 结论

本研究通过对尕斯库勒湖草甸土壤连续3年添加实验,探讨了氮磷添加下沼泽草甸土壤碳氮磷含量及其化学计量短期变化特征。研究结果表明,不同添加处理均显著降低SOC含量,而增加TN和TP含量;同时不同添加处理显著降低C:N,加速了有机质转化潜力,并显著增加N:P,即短期的氮磷输入能够有效缓解该生态系统原先存在的强烈氮限制。综上所述,在受到强烈氮限制的高寒湿地生态系统,氮磷配施有利于改善尕斯库勒湖草甸土壤氮素状况,但在一定程度上抑制了该地区的碳汇能力。本研究为预测未来氮磷沉降加剧背景下高寒湿地土壤养分变化过程提供了基础数据。在未来湿地养分管理中,应合理配施,以维持土壤养分平衡和湿地生态系统的可持续利用。

参考文献

- [1] BAO B H, CHANG M Y, JIN S H, et al. Periodic flooding decoupled the relations of soil C, N, P, and K ecological stoichiometry in a coastal shelterbelt forest of eastern China [J]. *Forests*, 2023, 14(11): 2270
- [2] 林伟山, 德科加, 张琳, 等. 氮、磷添加对青藏高寒草甸土壤碳氮磷化学计量特征影响的Meta分析[J]. *草地学报*, 2022, 30(12): 3345-3354
LIN W S, DE K J, ZHANG L, et al. Meta-analysis of the effects of nitrogen and phosphorus addition on the stoichiometric characteristics of soils carbon, nitrogen and phosphorus in Tibetan alpine meadow [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(12): 3345-3354
- [3] 刘玉祯, 刘文亭, 杨晓霞, 等. 放牧对全球草地生态系统碳氮磷化学计量特征影响的Meta分析[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(5): 1251-1259
LIU Y Z, LIU W T, YANG X X, et al. Effects of livestock grazing on the C: N: P stoichiometry in global grassland eco-
- systems: A meta analysis [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(5): 1251-1259
- [4] IDOKO J E, CHEN H, XUE D. Stoichiometric characteristics and factors influencing soil carbon, nitrogen, and phosphorus in various types of peatlands: A meta-analysis [J]. *Catena*, 2025, 249: 108563
- [5] 刘月娇, 倪九派, 张洋, 等. 三峡库区紫色土旱坡地农桑配置模式对土壤养分的影响[J]. *草业学报*, 2015, 24(12): 38-45
LIU Y J, NI J P, ZHANG Y, et al. Effects of different crop-mulberry intercropping systems on nutrients in arid purple soils in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(12): 38-45
- [6] 汪攀, 王霖娇, 盛茂银, 等. 西南喀斯特石漠化生态系统植物多样性、土壤生态化学计量特征及其相关性分析[J]. *南方农业学报*, 2018, 49(10): 1959-1969
WANG P, WANG L J, SHENG M Y, et al. Plant diversity, ecological stoichiometry characteristics of soils and their correlation of the karst rocky desertification ecosystem in southwestern China [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2018, 49(10): 1959-1969
- [7] 李玮, 郑子成, 李廷轩, 等. 不同植茶年限土壤团聚体碳氮磷生态化学计量学特征[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(1): 9-16
LI W, ZHENG Z C, LI T X, et al. Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus within soil aggregates in tea plantations with different ages [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(1): 9-16
- [8] DAVLETSHINA N, ERMAKOVA E, DOLGOVA D, et al. Structure and FT-IR spectroscopic analyses of complexes phosphorylated betaines with rare earth metal ions [J]. *Inorganica Chimica Acta*, 2023, 545: 121245
- [9] 杨富贵, 李玉涛, 叶靳, 等. 氮磷添加对喀斯特草地土壤碳氮磷化学计量特征的影响[J]. *西南农业学报*, 2025, 38(6): 1297-1304
YANG F G, LI Y T, YE J, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in karst grasslands [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2025, 38(6): 1297-1304
- [10] 刘姝萱, 安慧, 张馨文, 等. 氮磷添加对荒漠草原土壤养分含量及生态化学计量特征的影响[J]. *环境科学*, 2023, 44(5): 2724-2734
LIU S X, AN H, ZHANG X W, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil nutrient content and stoichiometry in desert grassland [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(5): 2724-2734
- [11] LI L, LIU Y, XIAO T H, et al. Different responses of soil C: N: P stoichiometry to stocking rate and nitrogen addition level in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 165: 10396
- [12] 李焕茹, 朱莹, 田纪辉, 等. 碳氮添加对草地土壤有机碳氮磷含量及相关酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(8): 2470-2476
LI H R, ZHU Y, TIAN J H, et al. Effects of carbon and nitrogen additions on soil organic C, N, P contents and their catalyzed enzyme activities in a grassland [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(8): 2470-2476
- [13] WANG C H, ZHU F, ZHAO X, et al. The effects of N and P additions on microbial N transformations and biomass on saline-

- alkaline grassland of Loess Plateau of Northern China[J]. *Geoderma*, 2014, 213:419-425
- [14] SUN Y, WANG C T, CHEN X L, et al. Phosphorus additions imbalance terrestrial ecosystem C: N: P stoichiometry [J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(24):7353-7365
- [15] 李志强, 齐鹏, 王雅芝, 等. 氮磷添加对黄土高原小麦土壤养分含量及生态化学计量特征的影响[J]. *中国农学通报*, 2024, 40(10):95-102
- LI Z Q, QI P, WANG Y Z, et al. Effect of nitrogen and phosphorus addition on nutrient content and ecological stoichiometry characteristics of wheat soils in Loess Plateau [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(10):95-102
- [16] 孙凯. 长期氮磷输入对滨海湿地土壤碳氮磷矿化的影响及其微生物机制[D]. 北京:北京林业大学, 2023:2-4
- SUN K. Effects of long-term nitrogen and phosphorus input on soil carbon, nitrogen and phosphorus mineralization of coastal wetland and its microbial mechanism[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2023:2-4
- [17] LI J Y, HAN G X, WANG G M, et al. Imbalanced nitrogen-phosphorus input alters soil organic carbon storage and mineralization in a salt marsh[J]. *Catena*, 2022, 208:105720
- [18] WIDDIG M, HEINTZ-BUSCHART A, SCHLEUSS P M, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on microbial community composition and element cycling in a grassland soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 151:108041
- [19] 王迁. 内蒙古典型草原群落和化学计量特征对刈割和氮磷添加的响应[D]. 南京:南京信息工程大学, 2023:26-27
- WANG Q. Response of typical grassland communities and stoichiometric characteristics in Inner Mongolia to mowing and nitrogen-phosphorus addition[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2023:26-27
- [20] 卢朝阳, 马维伟, 杜佳团, 等. 杂海湿地地区沼泽草甸生长季土壤碳氮组分对增温施氮的响应[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(2):316-325
- LU Z Y, MA W W, DU J N, et al. Response of growing season soil carbon and nitrogen components to warming and nitrogen addition in marshy meadows of the Gahai Wetland Area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(2):316-325
- [21] JIA Y L, YU G R, HE N P, et al. Spatial and decadal variations in inorganic nitrogen wet deposition in China induced by human activity[J]. *Scientific reports*, 2014, 4(1):3763
- [22] CHEN X L, CHEN H Y H. Plant mixture balances terrestrial ecosystem C: N: P stoichiometry [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1):4562
- [23] WANG C T, LONG R J, WANG Q L, et al. Changes in plant diversity, biomass and soil C, in alpine meadows at different degradation stages in the headwater region of three rivers, China[J]. *Land Degradation & Development*, 2009, 20(2):187-198
- [24] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, et al. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98:139-151
- [25] 常文华, 马维伟, 李广, 等. 杂海湿地地区沼泽草甸退化对土壤氮转化酶活性的影响[J]. *草业学报*, 2023, 32(2):54-64
- CHANG W H, MA W W, LI G, et al. Effects of swamp meadow degradation on soil nitrogen invertase activity in wet areas of Gahai[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(2):54-64
- [26] 李淑卓, 马维伟, 李广, 等. 3年氮添加对高寒湿地草甸土壤可溶性氮组分的影响[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(4):360-368
- LIS Z, MA W W, LI G, et al. Effects of three-year nitrogen addition on soluble nitrogen fractions in wetland meadow Soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(4):360-368
- [27] WU J Q, LU Y H, WANG H Y, et al. Effects of nitrogen and phosphorus additions on CH₄ flux in wet meadow of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 887:163448
- [28] 杨永凯, 马维伟, 陈好, 等. 杂海湿地地区沼泽草甸土壤酶活性对短期增温施氮的响应[J]. *草地学报*, 2022, 30(12):3263-3271
- YANG Y K, MA W W, CHEN H, et al. Response of soil enzyme activities in marsh meadow in Gahai Wet Area to short-term warming and nitrogen addition[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(12):3263-3271
- [29] 刘畅, 陈积山, 朱瑞芬, 等. 氮添加对中国草地生物量和土壤有机碳含量影响的Meta分析[J]. *草地学报*, 2025, 33(7):2078-2089
- LIU C, CHEN J S, ZHU R F, et al. Meta-analysis of the impacts of nitrogen addition on biomass and soil organic carbon content of China Grasslands[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(7):2078-2089
- [30] 张法伟, 李红琴, 祝景彬, 等. 氮添加和降水改变对高寒草甸生态系统地上与地下碳储的影响[J]. *植物生态学报*, 2025, 49(9):1399-1409
- ZHANG F W, LI H Q, ZHU J B, et al. Response of the above- and below-ground carbon storage to nitrogen addition and precipitation change in an alpine meadow ecosystem [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2025, 49(9):1399-1409
- [31] 苏洁琼, 李新荣, 鲍婧婷. 施氮对荒漠化草原土壤理化性质及酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(3):664-670
- SU J Q, LI X R, BAO J T. Effects of nitrogen addition on soil physico-chemical properties and enzyme activities in desertified steppe [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(3):664-670
- [32] 刘红梅, 李洁, 王丽丽, 等. 氮添加对贝加尔针茅草原植物和土壤化学计量特征的影响[J]. *草业学报*, 2018, 27(7):25-35
- LIU H M, LI J, WANG L L, et al. Effects of nitrogen addition on the stoichiometric characteristics of plants and soil in the *Stipa baicalensis* grassland of Inner Mongolia, China [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(7):25-35
- [33] 罗亲普, 龚吉蕊, 徐沙, 等. 氮磷添加对内蒙古温带典型草原净氮矿化的影响[J]. *植物生态学报*, 2016, 40(5):480-492
- LUO Q P, GONG J R, XU S, et al. Effects of N and P additions on net nitrogen mineralization in temperate typical grasslands in Nei Mongol, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, 40(5):480-492
- [34] WAN Q, YUE Z W, LIU B, et al. Different fates and retention of deposited NH₄⁺ and NO₃⁻ in an alpine grassland in Northwest China: A 15N tracer study [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2022, 201:104989
- [35] 翟珈莹. 氮磷添加对青藏高原高寒草地土壤微生物及化学计

- 量特征的影响[D]. 咸阳:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2020:13-22
- ZHAI J Y. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil microbes and stoichiometric characteristic of alpine meadow in Qinghai-Tibet Plateau[D]. Xianyang: University of Chinese Academy of Sciences(Institute of soil and water conservation, Chinese academy of sciences, ministry of water resources),2020:13-22
- [36] ZHANG Z C, HOU G, LIU M, et al. Degradation induces changes in the soil C:N:P stoichiometry of alpine steppe on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16(10):2348-2360
- [37] 杨明新,杨秀春,赵云,等. 黄河源园区高寒草地碳储量估算及其影响因素[J]. *生态学报*,2023,43(9):3546-3557
- YANG M X, YANG X C, ZHAO Y, et al. Estimated carbon storage and influencing factors of alpine grassland in the source region of the Yellow River[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2023,43(9):3546-3557
- [38] 刘岑薇,郑向丽,王俊宏,等. 陆生和水域生态系统植物的C、N、P生态化学计量特征研究综述[J]. *中国农学通报*,2017,33(17):70-75
- LIU C W, ZHENG X L, WANG J H, et al. Reviews on ecological stoichiometry characteristics of C, N, P in terrestrial and aquatic plants[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017,33(17):70-75
- [39] LUO R Y, FAN J L, WANG W J, et al. Nitrogen and phosphorus enrichment accelerates soil organic carbon loss in alpine grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Science of the Total Environment*,2019,650:303-312
- [40] LI J H, HOU Y L, ZHANG S X, et al. Fertilization with nitrogen and/or phosphorus lowers soil organic carbon sequestration in alpine meadows[J]. *Land Degradation & Development*, 2018,29(6):1634-1641
- [41] 郭洁芸,王雅歆,李建龙. 氮添加对中国陆地生态系统植物-土壤碳动态的影响[J]. *生态学报*,2022,42(12):4823-4833
- GUO J Y, WANG Y X, LI J L. Effects of nitrogen addition on plant-soil carbon dynamics in terrestrial ecosystems of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2022,42(12):4823-4833
- [42] 宋旭昕,刘同旭. 土壤铁矿物形态转化影响有机碳固定研究进展[J]. *生态学报*,2021,41(20):7928-7938
- SONG X X, LIU T X. Effects of soil iron mineral transformation on organic carbon sequestration: a review[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2021,41(20):7928-7938
- [43] BATTERMAN S A, WURZBURGER N, HEDIN L O. Nitrogen and phosphorus interact to control tropical symbiotic N₂ fixation: a test in *Inga punctata*[J]. *Journal of Ecology*, 2013,101(6):1400-1408
- [44] HOULTON B Z, MORFORD S L, DAHLGREN R A. Convergent evidence for widespread rock nitrogen sources in Earth's surface environment[J]. *Science*,2018,360(6384):58-62
- [45] 向雪梅,德科加,张琳,等. 氮素添加下短期内高寒草甸生物量与养分间的关系[J]. *中国草地学报*,2023,45(1):53-61
- XIANG X M, DE K J, ZHANG L, et al. Relationship between biomass and nutrients in alpine meadows under nitrogen fertilisation in the short term[J]. *Chinese Journal of Grassland*,2023,45(1):53-61
- [46] XIAO J N, DONG S K, SHEN H, et al. Phosphorus addition promotes nitrogen retention in alpine grassland plants while increasing N deposition[J]. *Catena*,2022,210:105887
- [47] 吴赞,彭云峰,杨贵彪,等. 青藏高原高寒草地退化对土壤及微生物化学计量特征的影响[J]. *植物生态学报*,2022,46(4):461-472
- WU Z, PENG Y F, YANG G B, et al. Effects of land degradation on soil and microbial stoichiometry in Qingzang Plateau alpine grasslands[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*,2022,46(4):461-472
- [48] TIAN L M, ZHAO L, WU X D, et al. Vertical patterns and controls of soil nutrients in alpine grassland: Implications for nutrient uptake[J]. *Science of the Total Environment*,2017,607:855-864
- [49] ZHANG Z X, HAO M, LI Y Q, et al. Effects of vegetation and terrain changes on spatial heterogeneity of soil C-N-P in the coastal zone protected forests at northern China[J]. *Journal of Environmental Management*,2022,317:115472
- [50] 刘顺,陈森,邢红爽,等. 川西亚高山森林演替对土壤碳氮磷及化学计量特征的影响[J]. *生态学报*,2025,45(13):6256-6268
- LIU S, CHEN M, XING H S, et al. Effects of subalpine forest succession on soil carbon, nitrogen, phosphorus and stoichiometry in western Sichuan Province China[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2025,45(13):6256-6268
- [51] JIANG Y F, GUO X. Stoichiometric patterns of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in farmland of the Poyang Lake region in Southern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019,19:3476-3488
- [52] GAO Y, HE N P, YU G R, et al. Long-term effects of different land use types on C, N, and P stoichiometry and storage in subtropical ecosystems: A case study in China[J]. *Ecological Engineering*,2014,67:171-181
- [53] QIAO Y, WANG J, LIU H M, et al. Depth-dependent soil CNP stoichiometry in a mature subtropical broadleaf forest[J]. *Geoderma*,2020,370:114357
- [54] 王嘉瑞,周俊菊,朱国锋. 中国土壤碳氮磷及生态化学计量研究综述[J]. *生态学杂志*,2024,43(8):2493-2501
- WANG J R, ZHOU J J, ZHU G F. A review of soil carbon, nitrogen, phosphorus and stoichiometry studies in China[J]. *Chinese Journal of Ecology*,2024,43(8):2493-2501

(责任编辑 付 宸)