网络出版时间:2026-02-04 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.08.015

大兴安岭耕地土壤类型肥力评价及其养分空间分异

王海兵[1,2,3],杨皓钦[1],李思琪[1],李晔祺[1],刘权文[1],何佩林[1],齐智伟[4]

(1 内蒙古农业大学 沙漠治理学院,内蒙古 呼和浩特 010018;2 内蒙古农业大学 旱区水工程生态环境全国重点实验室,内蒙古 呼和浩特 010018;3 内蒙古自治区风沙物理与防沙治沙工程重点实验室,内蒙古 呼和浩特 010018;
4 锡林郭勒盟林业和草原资源监测保障中心,内蒙古 锡林郭勒 026000)

[摘 要] 【目的】探明大兴安岭地区不同耕地土壤类型的理化性质差异、养分垂直分布规律及肥力空间格局,为区域耕地分类管理和精准施肥提供科学依据。【方法】采用网格布点与典型剖面相结合的方法,在大兴安岭地区设置110个采样点,覆盖暗棕壤、栗钙土、棕壤、棕色针叶林土、沼泽土、潮土、灰色森林土、草甸土、褐土、风沙土、黑土和黑钙土等12种土壤类型,分别采集0~10,10~20,20~30和30~40 cm土层样品,测定土壤粒度组成、pH值、电导率、有机质、全氮、速效磷和速效钾含量,计算各个类型土壤的肥力指数(soil fertility index,SFI),并分析SFI的空间分布格局和土壤理化性质与SFI的相关性。【结果】大兴安岭地区12类耕地0~40 cm土层土壤的粒径累积分布曲线整体呈典型“S”型,且各类型间差异明显。其中潮土、黑钙土、栗钙土、黑土的平均黏粒含量较高,潮土、栗钙土和草甸土的平均粉粒含量较高,灰色森林土、沼泽土和棕色针叶林土的平均砂粒含量较高。在0~40 cm土层,随着土层深度的增加,不同类型土壤的pH值、电导率以及有机质、全氮、速效磷和速效钾含量有明显差异,其中有机质和全氮含量在20~30 cm土层相对较高,所有土层速效磷含量总体较低。SFI空间分布呈“北高南低、中部优于边缘”格局,沼泽土、灰色森林土和黑土的SFI标准化值位居前三,分别为76.49,70.96和66.81,棕壤最低(39.93)。相关性分析结果表明,SFI标准化值与有机质和全氮呈极显著正相关($P<0.01$),而与速效养分含量相关性较低。【结论】大兴安岭耕地中的各个类型土壤的肥力空间分布差异较大,有机质和全氮是影响土壤肥力的关键因子。

[关键词] 耕地;土壤肥力;空间变异;土壤分类;大兴安岭

[中图分类号] S158 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)08-0138-09

Fertility evaluation and spatial variation of soil nutrients in cultivated land of the Greater Khingan Mountains

WANG Haibing[1,2,3], YANG Haoqin[1], LI Siqi[1], LI Yeqi[1], LIU Quanwen[1], HE Peilin[1], QI Zhiwei[4]

(1 *College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia* 010018, *China*; 2 *State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia* 010018, *China*; 3 *Inner Mongolia Key Laboratory of Aeolian Physics and Desertification Control Engineering, Hohhot, Inner Mongolia* 010018, *China*; 4 *Xilingol League Forestry and Grassland Resources Monitoring and Support Center, Xilingol, Inner Mongolia* 026000, *China*)

Abstract: 【Objective】 This research aims to explore the differences in physical and chemical properties, vertical distribution of nutrients and spatial pattern of fertility of different soil types in the Greater Khingan Mountains, to provide scientific basis for classification management and precise fertilization of regional cultivated land. 【Method】 The combining method of grid distribution and typical profiles was adopted, and 110 sampling points

[收稿日期] 2025-08-22 [修回日期] 2025-10-28
[基金项目] 内蒙古自治区教育专项资金项目(2025);内蒙古农业大学旱区水工程生态环境全国重点实验室项目(SQ2024SKL08048)
[作者简介] 王海兵(1982—),男,内蒙古乌兰察布人,博士,主要从事干旱区地表风沙灾害过程及防沙治沙研究。E-mail:hbwang@imau.edu.cn

were set up in Greater Khingan Mountains area. 12 soil types were covered, including dark brown soil, chestnut soil, brown soil, brown coniferous forest soil, swamp soil, fluvo-aquic soil, gray forest soil, meadow soil, cinnamon soil, aeolian sandy soil, black soil and chernozem. Soil samples were collected from 0－10, 10－20, 20－30 and 30－40 cm soil layers, respectively. The soil particle size composition, pH value, electrical conductivity, organic matter, total nitrogen, available phosphorus and available potassium content were determined, and the soil fertility index (SFI) of each soil type was calculated. The spatial distribution pattern of SFI and the correlation between soil physical and chemical properties and SFI were analyzed.【Result】The cumulative distribution curve of particle size in 0－40 cm soil layer of 12 types of cultivated land in Greater Khingan Mountains showed a typical "S"-shaped pattern, with significant differences among different types. Among them, the average clay content of fluvo-aquic soil, chernozem, chestnut soil and black soil was relatively high, the average silt content of fluvo-aquic soil, chestnut soil and meadow soil was relatively high, and the average sand content of grey forest soil, swamp soil and brown coniferous forest soil was relatively high. In the 0－40 cm soil layer, the pH value, electrical conductivity and the contents of organic matter, total nitrogen, available phosphorus and available potassium in different types of soil significantly varied with increasing soil depth. And the contents of organic matter and total nitrogen were relatively high in the 20－30 cm soil layer. The content of available phosphorus was generally low in all soil layers. The spatial distribution of SFI showed a pattern of 'high in the north and low in the south, better in the middle than in the edge'. The standardized SFI values of swamp soil (76.49), gray forest soil (70.96) and black soil (66.81) ranked the top three, and that of brown soil was the lowest (39.93). The results of correlation analysis showed that the standardized SFI was significantly positively correlated with organic matter and total nitrogen ($P<0.01$), while its correlation with available nutrient content was relatively low.【Conclusion】The spatial distribution of soil fertility in different types of cultivated land in Greater Khingan Mountains shows significant difference. Organic matter and total nitrogen are the key factors affecting soil fertility.

Key words: cultivated land; soil fertility; spatial variation; soil classification; Greater Khingan Mountains

东北黑土区是世界三大黑土区之一，也是我国重要的商品粮生产基地，承担着保障国家粮食安全的重要使命[1]。大兴安岭地区作为东北黑土区的重要组成部分，其土壤资源的合理开发利用对于维护生态安全和粮食安全具有重要意义。然而，随着农业集约化程度的不断提高和气候变化的影响，该地区土壤退化问题日益严重，主要表现为土壤肥力下降、结构板结、侵蚀加剧等问题。土壤肥力空间变异性是土壤科学研究的重要内容和精准农业实施的基础，主要受成土母质、地形地貌、气候条件、植被类型、人类活动等因素的综合影响[2]。大兴安岭地区地形复杂、母质多样、植被丰富，土壤类型空间分异明显，导致土壤肥力空间变异性增强[3]。随着GIS和地统计学方法的发展，土壤肥力空间变异研究取得重要进展。虽然国内外学者对不同地区土壤肥力空间变异开展了大量研究[4-5]，但针对大兴安岭黑土区耕地的研究相对较少，特别是不同土壤类型养分空间分异特征的系统研究尚不充分，对大兴安岭不同类型土壤肥力空间变异进行研究，对该地区耕地分类管理具有重要意义。

土壤肥力评价是土壤质量评价的重要组成部分，也是土壤资源合理利用的前提。传统的土壤肥力评价方法主要基于单一指标或简单的综合指数，难以全面反映土壤肥力的综合状况[6]。随着土壤肥力评价理论和方法的发展，综合肥力指数法、模糊数学法、主成分分析法等多种方法得到了广泛应用[7]。土壤肥力指数(soil fertility index，SFI)作为一种综合评价方法，能够整合多个理化指标，更加客观地反映土壤的综合肥力水平。虽然国内外学者建立了多种土壤质量和肥力评价体系，但这些体系多适用于温带和热带土壤，对于我国东北黑土区的适用性仍需进一步验证[8]。

目前，针对大兴安岭地区土壤的研究多集中在单一土壤类型或特定理化指标方面，缺乏对不同土壤类型理化性质差异的系统比较和综合肥力评价。同时，对该地区土壤的研究在空间尺度上多局限于点位或小区域，缺乏区域尺度的空间分布规律分析。本研究以大兴安岭地区12种典型土壤类型为对象，系统分析不同土壤类型的粒径分布特征、理化性质垂直分布规律和空间变异特征，构建综合肥

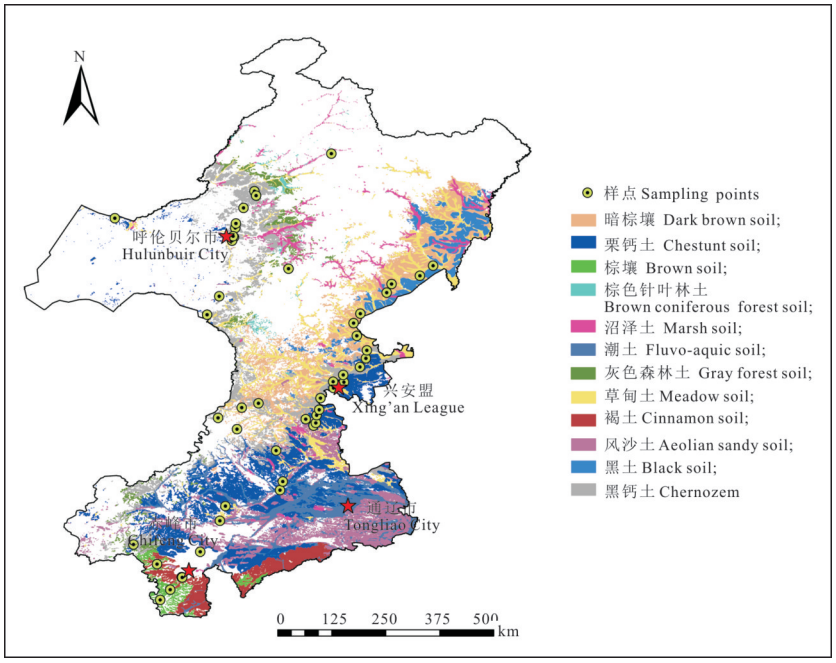
力评价体系,旨在揭示该地区土壤理化性质的分布规律和肥力空间格局,为该区域土壤资源的合理利用和可持续管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大兴安岭地区位于中国东北部,地理坐标为50°10′－53°33′ N,121°12′－127°00′ E,是我国最北部的地区之一。研究区位于大兴安岭南坡,海拔200～800 m,地势西北高、东南低,属于典型的低山丘陵地貌。该地区属于寒温带大陆性季风气候,年平均气温－2.6℃,年降水量500～600 mm,无霜期90～110 d,积温2 000～2 500 ℃[9]。

研究区土壤类型复杂多样,主要发育在第四纪冲洪积物、坡积物和残积物母质上。根据《中国土壤分类与代码》[10]和实地调查结果,研究区共识别出12种土壤类型,分别为:暗棕壤(dark brown soil)、栗钙土(chestnut soil)、棕壤(brown soil)、棕色针叶林土(gray coniferous forest soil)、沼泽土(marsh soil)、潮土(fluvo-aquic soil)、灰色森林土(gray forest soil)、草甸土(meadow soil)、褐土(cinnamon soil)、风沙土(aeolian sandy soil)、黑土(black soil)和黑钙土(chernozem)。



审图号:蒙S(2023)027号和蒙S(2023)029号。

Image number: Mon S(2023)027 and Mon S(2023) 029.

图1 大兴安岭耕地土壤类型的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of cultivated land soil types in the Greater Khingan Mountains

研究区农业生产以大豆、玉米、小麦等作物种植为主,耕作制度以一年一熟为主。近年来,随着农业机械化水平的提高和农业结构的调整,研究区农业生产方式发生了显著变化,对土壤环境产生了一定影响[9]。

1.2 样品采集与处理

采用网格布点与典型剖面相结合的方法进行土壤样品采集。首先基于研究区的地形图、土壤图和植被图,结合实地踏勘结果,按照不同土壤类型在研究区内设置采样点110个,确保每个采样点的各种土壤类型和地形条件都有代表性[11]。在每个采样点,分别采集0～10,10～20,20～30和30～40 cm土层土样,每层采集约500 g新鲜土样[12]。采样时详细记录采样点的地理坐标、海拔、坡度、坡向、植被类型、土地利用方式等环境信息。将采集的土壤样品带回实验室后,首先剔除植物根系、石块等杂物,然后在通风良好的室内自然风干。风干后的土样用木棒轻轻压碎,过2 mm筛后装袋保存,用于土壤理化性质分析。

1.3 测定指标及方法

按照《土壤农业化学分析方法》[13]进行土壤理化性质测定,其中土壤粒度(砂粒、粉粒和黏粒)采用Master sizer 3000激光粒度仪测定;土壤pH值采用电位法测定;有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定;全氮含量采用凯氏定氮法测定;速效磷含量

采用钼锑抗比色法测定；速效钾含量采用醋酸铵浸提-火焰光度法测定；电导率采用电导率仪测定。

1.4　土壤肥力指数计算

采用文献[14]的方法计算土壤肥力指数（SFI），该指数通过加权前 n 个主成分的得分来综合评估土壤的养分状况：

$$SFI=\sum_{i=1}^{n} W_i \times PC_i。$$

式中：W_i 为第 i 个主成分的权重（以贡献率作为权重），PC_i 为第 i 个主成分的得分。

为便于比较和应用，将各个指标的 SFI 值进行标准化处理，具体计算公式为：

$$SFI_{STD}=\frac{SFI-SFI_{min}}{SFI_{max}-SFI_{min}}\times 100。$$

式中：SFI_{STD} 为标准化后的 SFI 值。

1.5　数据处理

运用 ArcGIS Pro 进行空间插值分析，采用反距离权重法（IDW）生成土壤肥力指数空间分布图[15]。利用 SPSS 26.0 进行统计分析和 Pearson's 相关性分析，采用 Origin 2024 制图。

2　结果与分析

2.1　不同类型土壤粒径的分布特征

从图 2 可以看出，大兴安岭地区 12 类耕地 0～40 cm 土层的粒径累积分布曲线整体呈典型“S”型，且各类型间差异明显。在粒径 0.02 mm 处，黑土 0～10 cm 土层粒径累积体积百分比最高达 40.16%，沼泽土为 38.52%，暗棕壤为 31.89%，黑钙土为 25.73%，草甸土为 23.35%，灰色森林土为 24.58%，棕色针叶林土为 25.88%，褐土为 24.94%，潮土为 31.78%，栗钙土为 18.61%，风沙土仅 19.38%，棕壤最低为 11.01%，显示各类型土壤质地差异明显。

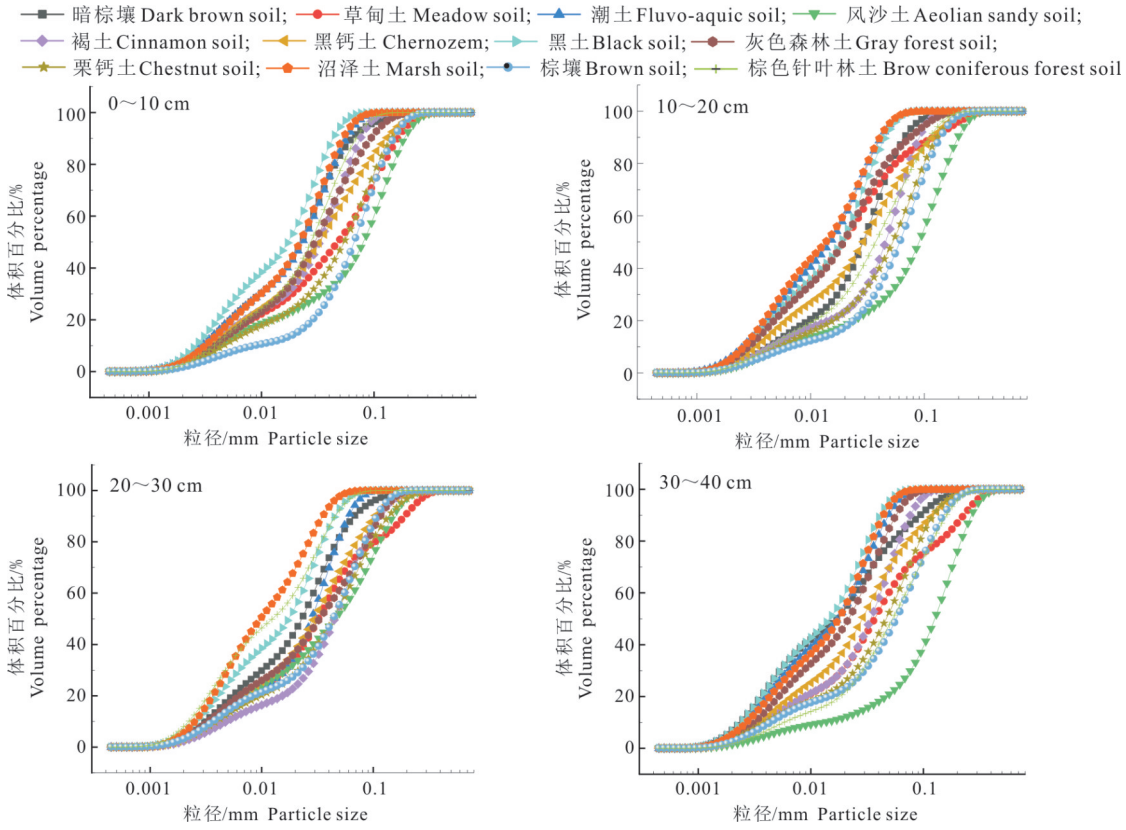


图 2　大兴安岭耕地不同类型土壤粒径分布的比较

Fig. 2　Comparison of particle size distribution among different soil types of cultivated land in the Greater Khingan Range

在粒径 0.1 mm 处，黑土 0～10 cm 土层粒径累积体积百分比达 96.45%，沼泽土为 99.71%，潮土为 99.77%，而风沙土仅 62.65%，棕壤为 74.76%，反映了各类型土壤粗颗粒含量差异较大。在粒径 0.02 mm 处，随着土层深度的增加，草甸土的粒径累积体积百分比从 23.35%（0～10 cm 土层）增至 32.35%（30～40 cm 土层），黑钙土从 25.73% 增至 26.74%，潮土从 31.78% 增至 40.77%；其他类型土壤粒径也表现出明显的变化规律。表明不同类型土壤剖面存在明显的颗粒分异现象。

表 1 显示,从 0~40 cm 土层平均值来看,潮土、黑钙土、栗钙土、黑土的黏粒含量较高,潮土、栗钙土和草甸土的粉粒含量较高,灰色森林土、沼泽土和棕色针叶林土的砂粒含量较高。

表 1 大兴安岭耕地 0~40 cm 土层土壤物理性质平均值

Table 1 Mean value of soil physical properties in 0−40 cm soil layer of cultivated land in Greater Khingan Mountains

土壤类型 Soil type	黏粒/% Clay	粉粒/% Silt	砂粒/% Sand	电导率(EC)/(μS·cm^{-1})	pH
栗钙土 Chestnut soil	3.92	35.02	61.05	0.17	7.00
暗棕壤 Dark brown soil	3.23	31.90	64.87	0.11	6.68
草甸土 Meadow soil	3.54	34.14	62.32	0.13	6.75
潮土 Fluvo-aquic soil	5.41	47.79	46.81	0.22	7.28
风沙土 Aeolian sandy soil	2.73	28.54	68.72	0.15	7.09
褐土 Cinnamon soil	3.61	34.36	62.03	0.16	7.30
黑钙土 Chernozem	4.01	32.44	63.55	0.12	6.51
黑土 Black soil	3.91	30.21	65.87	0.12	6.61
灰色森林土 Gray forest soil	2.30	23.89	73.82	0.17	6.86
沼泽土 Marsh soil	2.57	26.56	70.88	0.22	7.20
棕壤 Brown soil	2.70	27.37	69.93	0.22	7.22
棕色针叶林土 Brown coniferous forest soil	2.84	27.07	70.09	0.16	6.74

2.2 不同类型土壤理化性质的垂直分布特征

图 3 显示,在 0~40 cm 土层,随着土层深度增加,各类型土壤理化性质有明显差异。在 0~20 cm 土层,土壤速效钾含量以灰色森林土最高,而在 30~40 cm 土层以沼泽土(178.00 mg/kg)和棕壤(154.20 mg/kg)较高。在 0~40 cm 土层,黑土、栗钙土的速效磷含量总体较高;沼泽土、黑土的有机质和全氮含量均较高。

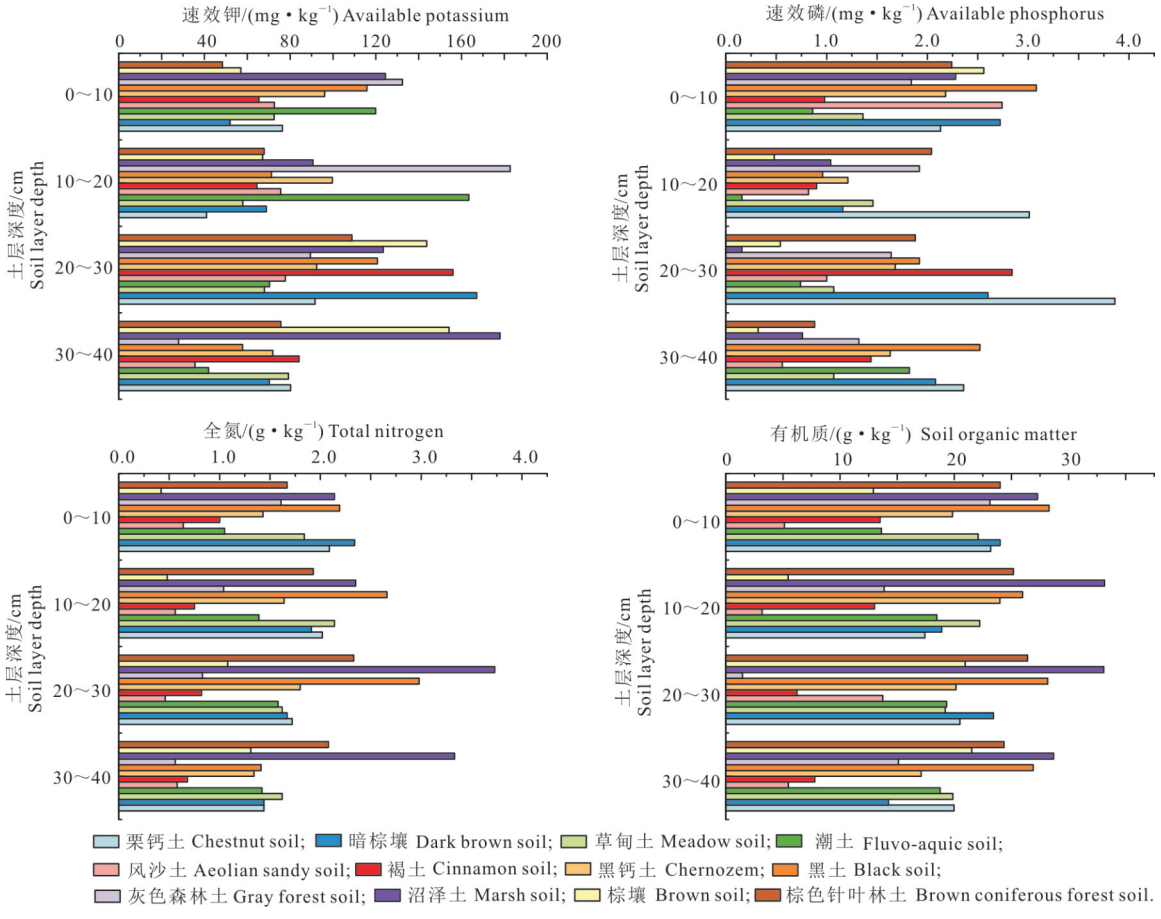


图 3 大兴安岭耕地不同类型土壤理化性质在 0~40 cm 土层的分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of soil physicochemical properties in 0−40 cm soil layer of different types of cultivated land in the Greater Khingan Mountains

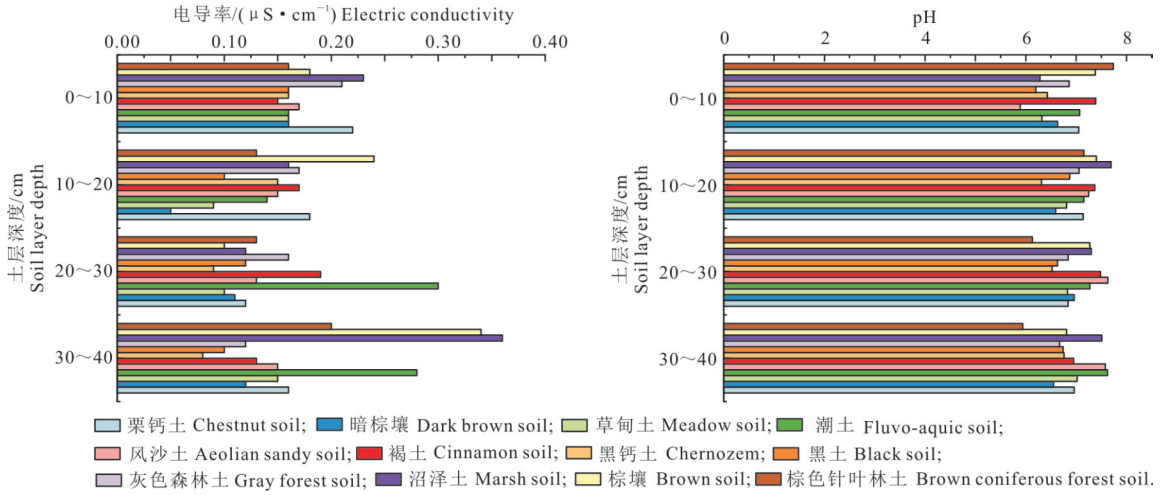


图 3　大兴安岭耕地不同类型土壤理化性质在 0～40cm 土层的分布特征（续）

Fig. 3　Distribution characteristics of soil physicochemical properties in 0－40 cm soil layer of different types of cultivated land in the Greater Khingan Mountains（continued）

在 0～10 cm 土层，土壤电导率以灰色森林土、沼泽土和栗钙土较高；在 10～20 cm 土层，以栗钙土和棕壤较高；在 20～30 cm 土层，以潮土和褐土较高；在 30～40 cm 土层，以棕壤、沼泽土和潮土较高。在 0～40 cm 土层，各类型土壤 pH 值的差异较小，其中棕色针叶林土 0～10 cm 土层 pH 最高（7.74），30～40 cm 土层 pH 最低（5.94）。

表 1 和表 2 显示，沼泽土的平均速效钾含量最高（129.15 mg/kg），明显高于其他土壤类型；栗钙土的平均速效磷含量最高（2.84 mg/kg）；沼泽土的平均全氮含量最高（2.89 g/kg），黑土次之（2.31 g/kg）；黑钙土和沼泽土的平均有机质含量最高，均达到 30.55 g/kg。土壤 pH 平均值在 6.51～7.30，多数呈中性至弱碱性，其中褐土平均 pH 值最高（7.30），黑钙土最低（6.51）。不同类型土壤电导率整体处于较低水平（0.05～0.36 μS/cm），其中沼泽土、棕壤和潮土平均电导率均较高，均为 0.22 μS/cm，可能与特殊的水盐运移过程有关。

表 2　大兴安岭耕地 0～40 cm 土层土壤养分平均值及肥力指数

Table 2　Average soil nutrients and fertility index in 0－40 cm soil layer of cultivated land in Greater Khingan Mountains

土壤类型 Soil type	速效钾/(mg·kg⁻¹) AK	速效磷/(mg·kg⁻¹) AP	全氮/(g·kg⁻¹) TN	有机质/(g·kg⁻¹) SOM	SFI_{STD}
栗钙土 Chestnut soil	72.30	2.84	1.82	17.54	54.81
暗棕壤 Dark brown soil	89.53	2.14	1.84	6.88	51.76
草甸土 Meadow soil	69.41	1.24	1.81	10.14	54.65
潮土 Fluvo-aquic soil	98.85	0.90	1.36	20.26	59.22
风沙土 Aeolian sandy soil	65.38	1.28	0.56	27.34	46.60
褐土 Cinnamon soil	92.50	1.54	0.81	13.39	49.82
黑钙土 Chernozem	90.02	1.68	1.55	30.55	52.95
黑土 Black Soil	91.40	2.12	2.31	15.21	66.81
灰色森林土 Gray forest soil	108.10	1.68	1.01	24.99	70.96
沼泽土 Marsh soil	129.15	1.06	2.89	30.55	76.49
棕壤 Brown soil	105.53	0.98	0.82	15.21	39.93
棕色针叶林土 Brown coniferous forest soil	75.16	1.76	2.00	24.99	56.92

2.3　不同类型土壤肥力指数的空间分布特征

表 2 显示，研究区 12 种土壤的肥力指数（SFI）标准化值（SFI_{STD}）存在明显差异，其中沼泽土（76.49）、灰色森林土（70.96）和黑土（66.81）位居前三，表明这些土壤类型通常具有较高的养分含量。棕壤和风沙土的土壤肥力指数标准化值相对较低，反映了这些土壤类型肥力较低。

图 4 显示，大兴安岭耕地土壤肥力指数标准化值呈明显空间分异。高肥力区域主要分布在中部和北部地区，这些区域以黑土、黑钙土和沼泽土为主，土壤肥力指数标准化值普遍较高。中等肥力区域呈片状分布于中南部，主要为暗棕壤和草甸土分布区。低肥力区域主要集中在南部和部分边缘地带，以风沙土、棕壤等土壤类型为主。这种空间分布格局与

研究区的地形地貌、气候条件和土壤类型分布密切相关,表明自然环境因子对土壤肥力形成的重要影响。整体而言,研究区耕地土壤肥力水平整体呈现出“北高南低、中部优于边缘”的空间分布特征。

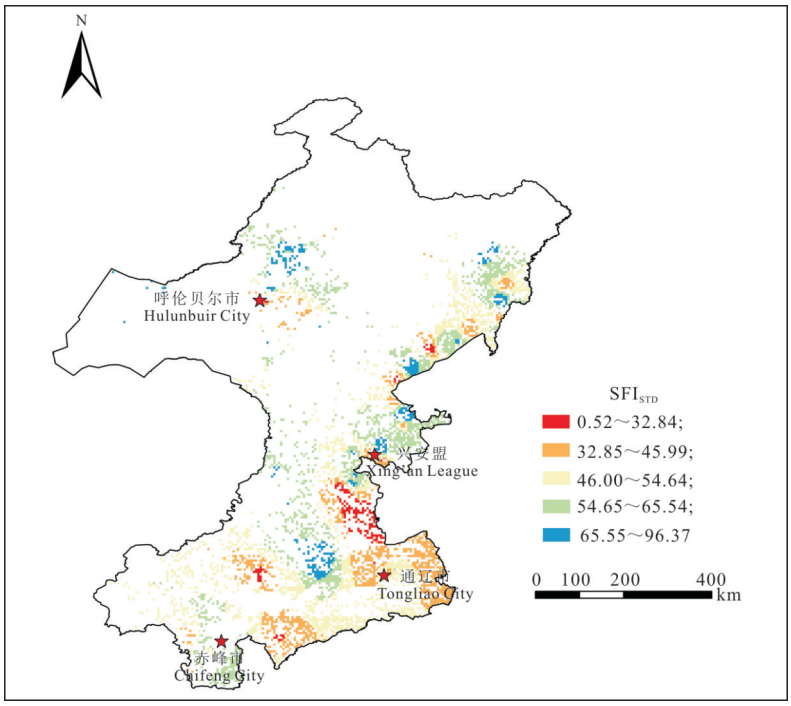
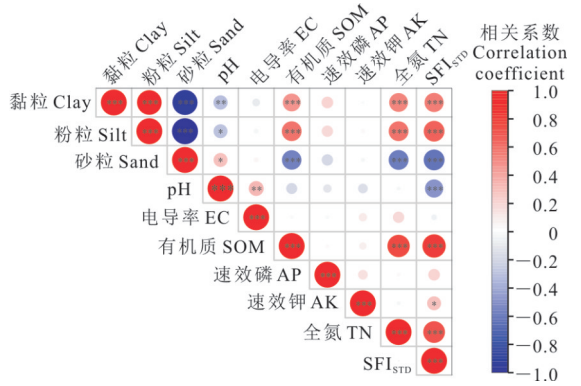


图 4 大兴安岭耕地土壤肥力指数的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the soil fertility index in cultivated land of the Greater Khingan Range

2.4 土壤肥力指数与理化性质的相关性

大兴安岭耕地土壤肥力指数(SFI)与理化性质指标间 Pearson's 相关性分析见图 5。



*、**、***分别表示在 $P<0.05$、$P<0.01$、$P<0.001$ 水平显著相关。

*,**,*** indicates significant correlation at $P<0.05$, $P<0.01$, and $P<0.001$ level.

图 5 大兴安岭耕地土壤肥力指数与理化性质指标间的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis between soil fertility index and physico-chemical property indicators in cultivated land of the Greater Khingan Range

图 5 显示,土壤肥力指数标准化值与各理化性质指标间存在不同程度的相关关系。SFI 标准化值与土壤有机质和全氮含量均呈极显著正相关,表明有机质和全氮是影响土壤综合肥力的关键因子。速效钾、速效磷等速效养分指标与 SFI 标准化值的相关性相对较低,这可能与研究区土壤的成土过程和养分循环特征有关。土壤 pH 值和电导率与 SFI 标准化值的相关性均不显著,表明在研究区范围内土壤 pH 和盐分含量对土壤综合肥力指数的直接影响较低。

3 讨 论

本研究发现,大兴安岭地区 12 种耕地土壤类型的理化性质及肥力指数存在显著分异特征,其中黑土细颗粒含量较高,0~10 和 10~20 cm 土层中粒径小于 0.02 mm 的颗粒累积体积分数分别达到约 60% 和 55%,全氮含量达到 2.31 g/kg,肥力指数高达 66.81,这与刘雅杰等[16]对大兴安岭南麓黑土农田的研究结果一致。本研究中,SFI 标准化值与有机质和全氮呈极显著正相关($P<0.01$),这与袁玉玉等[17]在吉林省黑土区的研究结果一致。本研究中,沼泽土的速效钾、全氮和有机质含量最高,灰色森林土的速效钾和有机质含量较高,黑土的速效磷和全氮含量均较高,且其 SFI 标准化值位列前三;棕壤土和风沙土的土壤养分含量总体较低,其 SFI 标准化值均较低,表明 SFI 能准确反映土壤肥力的综

合状况。

成土过程和母质特征是影响土壤类型间理化性质和肥力差异的原因之一。本研究中，黑钙土和黑土的黏粒含量较高，其中黑土的平均全氮含量较高，黑钙土的平均有机质含量最高，这是因为黑土和黑钙土在相对平坦地形条件下，通过长期生物积累和腐殖质化过程形成厚实腐殖质层，丰富的有机质含量和良好的微生物活性促进了氮素的固定和积累，这与前人的研究结果[17-18]一致。本研究中，沼泽土平均速效钾含量最高，明显高于其他土壤类型，这是因为沼泽土长期水分饱和的还原环境抑制了钾素淋溶损失[19]。本研究中，大兴安岭耕地SFI空间分布呈“北高南低、中部优于边缘”特征，与东北黑土区有机碳空间格局[4,20]相呼应，这是因为研究区南部边缘地区主要分布着风沙土和棕壤，而这两种土壤成土母质贫瘠、砂粒含量高，保水保肥能力差；加之该地区地形起伏大，坡度较陡，水土流失严重，导致表层土壤流失，肥力水平较低[21]。刘琼玉等[9]指出，大兴安岭中部森林覆盖率高，降水量充沛，温度适宜，为土壤有机质形成和保存创造了良好条件。LI等[20]发现，地形、气候和母质是影响东北黑土区土壤有机质空间分布的多尺度因子，本研究中大兴安岭耕地SFI的空间分布进一步验证了前人的研究结果。

长期耕作和施肥管理是改变土壤理化性质垂直分异的重要人为驱动力。本研究中，深层土壤粗颗粒含量普遍增加，粒径分布曲线呈现向右偏移趋势，这一现象的形成机制可归结为：长期耕作使表层细粒富集，短期翻耕亦会显著改变颗粒再分布，东北暗棕壤中尤为明显；此外，随着土壤淋溶作用的进行，黏粒逐渐聚集为较大粒径土壤颗粒向深层土壤移动，使深层粗颗粒相对含量增加；表层土壤频繁扰动加速了有机质分解矿化，改变了土壤团聚体稳定性。本研究中，土壤有机质和全氮含量在20～30 cm土层相对较高，这与都彦廷等[3]的研究结果一致，这是由于该土层微生物活性相对较低，有机质分解速率减缓，有利于养分保存；同时该土层植物根系密集分布，有利于有机质积累，根际微生物活动促进养分转化和固定。本研究中，多数土壤速效磷含量普遍偏低，这与前人发现的东北黑土区磷素固定能力强、有效性差的结果[17]一致。针对研究区磷素普遍缺乏的现状，宜采用深施或条带施肥以提高磷肥有效性并减少表层土壤对磷素的固定；同时增加有机物料投入，通过秸秆还田与施用有机肥提升有机质含量，配合保护性耕作减少深翻以稳定团聚体和改善土壤结构[6]。

本研究仅分析了大兴安岭地区12种典型土壤类型0～40 cm土层土壤理化性质的变化，缺乏多年时间序列数据，无法准确评估耕作和施肥管理对土壤理化性质的长期影响；也未涉及土壤微生物群落对有机质分解和养分转化的调控作用，对人为管理措施（如施肥量、耕作方式等）与土壤肥力变化的定量关系缺乏系统分析[22-23]。未来应开展长期定位监测，结合微生物学和分子生物学方法揭示土壤肥力演变的微观过程，并通过田间试验分析不同管理措施对土壤肥力的影响，为区域土壤培肥和可持续发展提供更精准的科学指导。

4　结　论

大兴安岭地区耕地12类土壤的理化性质与肥力空间分布分析结果发现，不同土壤类型之间粒径组成与养分含量差异明显。SFI分布呈“北高南低、中心优于边缘”的空间格局，沼泽土、灰色森林土与黑土的SFI标准化值均较高，分别为76.49，70.96，66.81。有机质与全氮是主导区域土壤肥力的关键因子，与SFI标准化值呈极显著正相关（$P<0.01$）。本研究结果为大兴安岭耕地的分类管理与精准施肥提供了科学依据。

[参考文献]

[1] 李娜，龙静泓，韩晓增，等. 短期翻耕和有机物还田对东北暗棕壤物理性质和玉米产量的影响[J]. 农业工程学报，2021，37(12)：99-107.
LI N，LONG J H，HAN X Z，et al. Effects of short-term plowing and organic amendments on soil physical properties and maize yield in dark brown soil in Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2021，37(12)：99-107.

[2] 孔晨晨，张世文，袁胜君，等. 北京市农田土壤有机碳密度空间变异及影响因素[J]. 农业工程学报，2024，40(9)：119-127.
KONG C C，ZHANG S W，YUAN S J，et al. Spatial variation and influencing factors of soil organic carbon density in Beijing farmland of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2024，40(09)：119-127.

[3] 都彦廷，杨光辉，张冬有. 大兴安岭地区土壤有机质空间变异特征及影响因素分析[J]. 中国土壤与肥料，2021(6)：9-17.
DU Y T，YANG G H，ZHANG D Y. Spatial variability of soil organic matter and its influencing factors in Daxing'an Mountains[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China，2021(6)：9-17.

[4] LI Y F，CHEN Z，CHEN Y，et al. Predicting the spatial distri-

bution of soil organic carbon in the black soil area of northeast plain,China[J]. Sustainability,2025,17(2):396.

[5] DONG J R,ZHAO W Q,SHI P Y,et al. Soil differentiation and soil comprehensive evaluation of in wild and cultivated *Fritillaria pallidiflora* Schrenk[J]. Science of the Total Environment,2023,872:162049.

[6] 盛明,李佳垚,雷琬莹,等. 耕作方式与秸秆还田量对黑土有机碳组分和肥力指数的影响[J]. 土壤与作物,2025,14(1):53-63.
SHENG M,LI J Y,LEI W Y,et al. Characteristics of active carbon fractions and fertility index of black soil under different soil tillage and straw returning amount[J]. Soil and Crop,2025,14(1):53-63.

[7] CHEN J,QU M K,ZHANG J L,et al. Soil fertility quality assessment based on geographically weighted principal component analysis (GWPCA) in large-scale areas[J]. Catena,2021,201:105197.

[8] JIA X L,FANG Y,HU B F,et al. Development of soil fertility index using machine learning and visible-near-infrared spectroscopy[J]. Land,2023,12(12):2155.

[9] 刘琼玉,程全国,魏建兵,等. 大兴安岭地区生态系统完整性动态评价[J]. 应用生态学报,2019,30(9):3119-3125.
LIU Q Y,CHENG Q G,WEI J B,et al. Dynamic evaluation of ecosystem integrity in Greater Khingan Range area,China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2019,30(9):3119-3125.

[10] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 中国土壤分类与代码:GB/T 17296—2009[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
General Administration of Quality Supervision,Inspection and Quarantine,China National Standardization Management Committee. Chinese soil classification and code:GB/T 17296—2009[S]. Beijing:China Standard Press,2009.

[11] 刘素云. 农田土壤监测样点布设与样品采集[J]. 农业环境科学学报,1987,6(5):24-26.
LIU S Y. Sampling layout and sample collection of farmland soil monitoring[J]. Journal of Agro-Environmental Science,1987,6(5):24-26.

[12] XIA S P,SONG Z L,VAN ZWIETEN L,et al. Storage,patterns and influencing factors for soil organic carbon in coastal wetlands of China[J]. Global Change Biology,2022,28(20):6065-6085.

[13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2000.
LU R K. Methods of soil agrochemical analysis[M]. Beijing:China Agricultural Science and Technology Press,2000.

[14] JUHOS K,CZIGÁNY S,MADARÁSZ B,et al. Interpretation of soil quality indicators for land suitability assessment-amultivariate approach for Central European arable soils[J]. Ecological Indicators,2019,99:261-272.

[15] KUMAR N,SINHA N K. Geostatistics:principles and applications in spatial mapping of soil properties[M]//Geospatial Technologies in Land Resources Mapping,Monitoring and Management. Cham:Springer International Publishing,2018:143-159.

[16] 刘雅杰,白东星,张向前,等. 耕作方式对大兴安岭南麓黑土农田土壤物理特性及有机碳储量的影响[J]. 土壤通报,2025,56(2):409-419.
LIU Y J,BAI D X,ZHANG X Q,et al. Effects of tillage methods on soil physical characteristics and organic carbon storage in soil farmland at the southern foot of the Daxing'an Mountains[J]. Chinese Journal of Soil Science,2025,56(2):409-419.

[17] 袁玉玉,王洋,崔政武,等. 吉林省黑土区不同类型土壤pH值及其与养分的关系[J]. 土壤与作物,2025,14(3):338-347.
YUAN Y Y,WANG Y,CUI Z W,et al. Soil pH values of different soil types and their relationship with nutrients in the black soil region of Jilin Province[J]. Soil and Crop,2025,14(3):338-347.

[18] 王冰,张鹏杰,张秋良. 不同林龄兴安落叶松林土壤总有机碳与理化性质的关系[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2021,49(10):36-45.
WANG B,ZHANG P J,ZHANG Q L. Relationship between total organic carbon and physicochemical properties of soil in *Larix gmelinii* forests of different ages[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2021,49(10):36-45.

[19] 刘希瑶,刘澎,刘驰. 典型黑土中有机质和养分元素的变化分析[J]. 地质与资源,2022,31(04):500-507.
LIU X Y,LIU P,LIU C. Analysis of changes in organic matter and nutrient elements in typical black soil[J]. Geology and Resources,2022,31(4):500-507.

[20] LI Y,ZHENG S F,WANG L P,et al. Systematic identification of factors influencing the spatial distribution of soil organic matter in croplands within the black soil region of Northeastern China across multiple scales[J]. Catena,2025,249:108633.

[21] XIONG J F,WU H Y,WANG X R,et al. Response of soil fertility to soil erosion on a regional scale:a case study of Northeast China[J]. Journal of Cleaner Production,2024,434:140360.

[22] 杨帆,贾伟,杨宁,等. 近30年我国不同地区农田耕层土壤的pH变化特征[J]. 植物营养与肥料学报,2023,29(07):1213-1227.
YANG F,JIA W,YANG N,et al. Characteristics of pH changes in cultivated layer soil of farmland in different regions of China in the past 30 years[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2023,29(7):1213-1227.

[23] 梁爱珍,张延,陈学文,等. 东北黑土区保护性耕作的发展现状与成效研究[J]. 地理科学,2022,42(08):1325-1335.
LIANG A Z,ZHANG Y,CHEN X W,et al. Development status and effectiveness of conservation tillage in the black soil region of Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica,2022,42(8):1325-1335.

(责任编辑:李小平)