

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.02.021.

李健, 薛澄, 杨扬, 等. 黄淮海平原不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异预测[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 101-109.

Li Jian, Xue Cheng, Yang Yang, et al. Prediction of Spatial Variation of Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Huang-Huai-Hai Plain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 101-109.

黄淮海平原不同土地利用方式下 土壤呼吸空间变异预测

李健¹, 薛澄^{1,2}, 杨扬¹, 谢梦姣¹, 彭正萍^{1,2}, 王洋^{1,2}

(1.河北农业大学 资源与环境科学学院/河北省农田生态环境重点实验室, 河北 保定 071000;

2.河北农业大学 国土资源学院, 河北 保定 071000)

摘要: [目的]探究土壤呼吸的空间变异特征及协同克里金法预测土壤呼吸准确性, 从而为精准预测陆地不同生态系统土壤碳收支研究提供数据参考。[方法]选取黄淮海平原北部典型耕地、草地和林地作为研究样区, 基于表征土壤理化性质的辅助指标用协同克里金法对土壤呼吸进行了预测, 以评估其与普通克里金法预测的精准度。[结果]土壤呼吸在不同土地利用方式的研究样区均呈现中等程度变异, 变异系数分别为 33%(耕地), 24%(草地)和 31%(林地)。土壤呼吸空间相关距离由大到小依次是林地(15.12 m)、耕地(3.83 m)和草地(2.47 m)。基于相关分析和协同克里金法模拟确定土壤呼吸空间变异最优辅助指标, 在耕地为碳磷比(C/P)、氮磷比(N/P)和土壤 pH 值; 草地和林地除共有辅助指标土壤水分(SM)和土壤温度(ST5)外, 土壤 pH 值和气温(TEMP)依次为其二者特有的辅助指标。土壤呼吸空间变异预测表明协同克里金均比普通克里金法插值精度高, 其在草地提升最为明显, 平均绝对误差(MAE)、平均相对误差(MRE)、均方根误差(RMSE)和平均标准误差(MSE)分别提高 10.14%, 9.82%, 9.10%, 10.87%, 在林地中各误差精度提高介于 4.78%(MAE)~12.09%(MRE), 在耕地中预测精度提升最小, 协同克里金法比普通克里金法预测精度仅平均提高 3.27%。[结论]土壤呼吸的影响因子作为辅助变量的协同克里金法可以更准确地预测林地、耕地和草地土壤呼吸的空间变异特征。

关键词: 土壤呼吸(SR); 普通克里金; 协同克里金; 土地利用; 地统计

中图分类号: S153; S154.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)02-0101-09

Prediction of Spatial Variation of Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Huang-Huai-Hai Plain

Li Jian¹, Xue Cheng^{1,2}, Yang Yang¹, Xie Mengjiao¹, Peng Zhengping^{1,2}, Wang Yang^{1,2}

(1.School of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University/Key

Laboratory of Farmland Eco-Environment of Hebei Province, Baoding, Hebei 071000, China;

2.School of Land and Resources, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the spatial variation characteristics of soil respiration and the accuracy of soil respiration prediction with Kriging method, so as to provide data reference for accurate prediction of soil carbon budget in different terrestrial ecosystems. [Methods] The typical farmland, grassland and forestland in the northern part of the Huang-Huai-Hai Plain were selected as sample areas, and the co-Kriging method was used to predict soil respiration based on the auxiliary indicators of soil physical and chemical properties, so as to evaluate the accuracy of prediction with the common Kriging method. [Results] Soil respiration showed moderate variation in different land use patterns, and the coefficients of

收稿日期: 2022-11-26

修回日期: 2023-03-16

资助项目: 国家重点研发计划项目“黄淮海粮田多因子障碍消减与产能提升技术模式集成及应用”(2021YFD1901005)

第一作者: 李健(1997—), 男, 河北承德人, 在读硕士研究生, 研究方向为农业资源与环境。E-mail: 1030811634@qq.com

通信作者: 王洋(1985—), 女, 河北保定人, 博士, 讲师, 主要从事土地利用变化与资源环境效应研究。E-mail: xiaoyiranwy85@163.com

<http://stbcjy.paperonce.org>

variation were 33% (farmland), 24% (grassland) and 31% (forest land), respectively. The correlation distances of soil respiration space in descending order were forest land (15.12 m), farmland (3.83 m) and grassland (2.47 m). Based on correlation analysis and co-Kriging simulation, the optimal auxiliary indexes of soil respiration space variation were determined, which were carbon/P ratio (C/P), nitrogen/P ratio (N/P) and pH value in farmland. In addition to soil moisture (SM) and soil temperature (ST5), pH value and temperature (TEMP) were the unique auxiliary indexes of grassland and forestland. Soil respiration spatial variation prediction showed that the interpolation accuracy of the collaborative Kriging method was higher than that of the ordinary Kriging method, and the improvement was most obvious in the grassland. The mean absolute error (MAE), mean relative error (MRE), root mean square error (RMSE) and mean standard error (MSE) increased by 10.14%, 9.82%, 9.10% and 10.87%, respectively. The improvement of each error accuracy was between 4.78% (MAE) and 12.09% (MRE) in forestland, and the improvement of prediction accuracy was the smallest in farmland, and the prediction accuracy of collaborative Kriging method was only 3.27% higher than that of ordinary Kriging method. [Conclusion] The co-Kriging method with the influence factors of soil respiration as auxiliary variables can more accurately predict the spatial variation characteristics of soil respiration in forestland, farmland and grassland.

Keywords: soil respiration (SR); ordinary Kriging; Co-Kriging; land use; geostatistics

土壤呼吸是全球土壤碳循环的重要组成部分,其空间异质性不仅能指示土壤微生物和理化性质的变化特征,还对估算区域碳收支起到重要作用。地统计学通过空间自相关作用揭示土壤属性变量的空间异质性,解释空间格局对生态过程与功能的影响^[1]。此外,还能减少取样的不确定性和降低调查成本,其中普通克里金法已广泛用于土壤属性空间异质性研究^[2],但其存在插值因子单一、不够精确的缺点^[3]。协同克里金法则根据与主变量之间的逻辑关系和相关性引入多辅助变量,尤其当辅助变量与主变量高度相关时,协同克里金法在减少误差方面明显优于普通克里金法^[4]。Golden 等^[5]对铅污染空间变异研究表明协同克里金法较普通克里金法均方根误差提高 28.97%,王汉东等^[6]在三峡区间面雨量插值研究表明协同克里金法较普通克里金法平均绝对误差提高 19.28%,均方根误差提高 10.25%。土壤呼吸具有较强的时空变异性^[7],但应用地统计学方法预测土壤呼吸空间变异的研究较少,利用辅助变量提高土壤呼吸空间变异预测精度和有效性的研究仅在耕地进行了有限的探索^[8],草地、林地等具有强大碳捕获潜力的土地利用类型中也亟待进一步开展更多实践。

基于辅助变量的协同克里金法可提高土壤呼吸预测精度。在不同土地利用方式下,由于植被生长及其主导的凋落物输入、土壤微生物种群差异造成土壤呼吸的不同,驱动耕地、草地、林地土壤呼吸空间变异的影响因子也存在差异。通常认为,土壤温度和水分

是影响各土地利用方式下土壤呼吸季节变化的主导因子^[9],但在空间异质性研究中,它们并不能完全解释土壤呼吸的空间变化。土壤有机碳可激发微生物的呼吸作用,其空间格局显著影响土壤呼吸的空间变异特征^[10]。另有研究表明,土壤 pH 值增加会引起土壤微生物类群改变,影响酶的组成和来源,对土壤呼吸产生显著改变^[11]。此外,土壤 N/P 变化,如磷添加措施会导致植被更易获取土壤磷素而减少植物根系向地下扩展,引起植物根系呼吸的降低^[12-13]。总体而言,土壤呼吸空间异质性影响因子复杂多样,为充分解释土壤呼吸空间变异特征,辅助变量的筛选宜包含土壤温度、土壤水分、土壤 pH 值及指示土壤养分特征的更多相关理化指标。

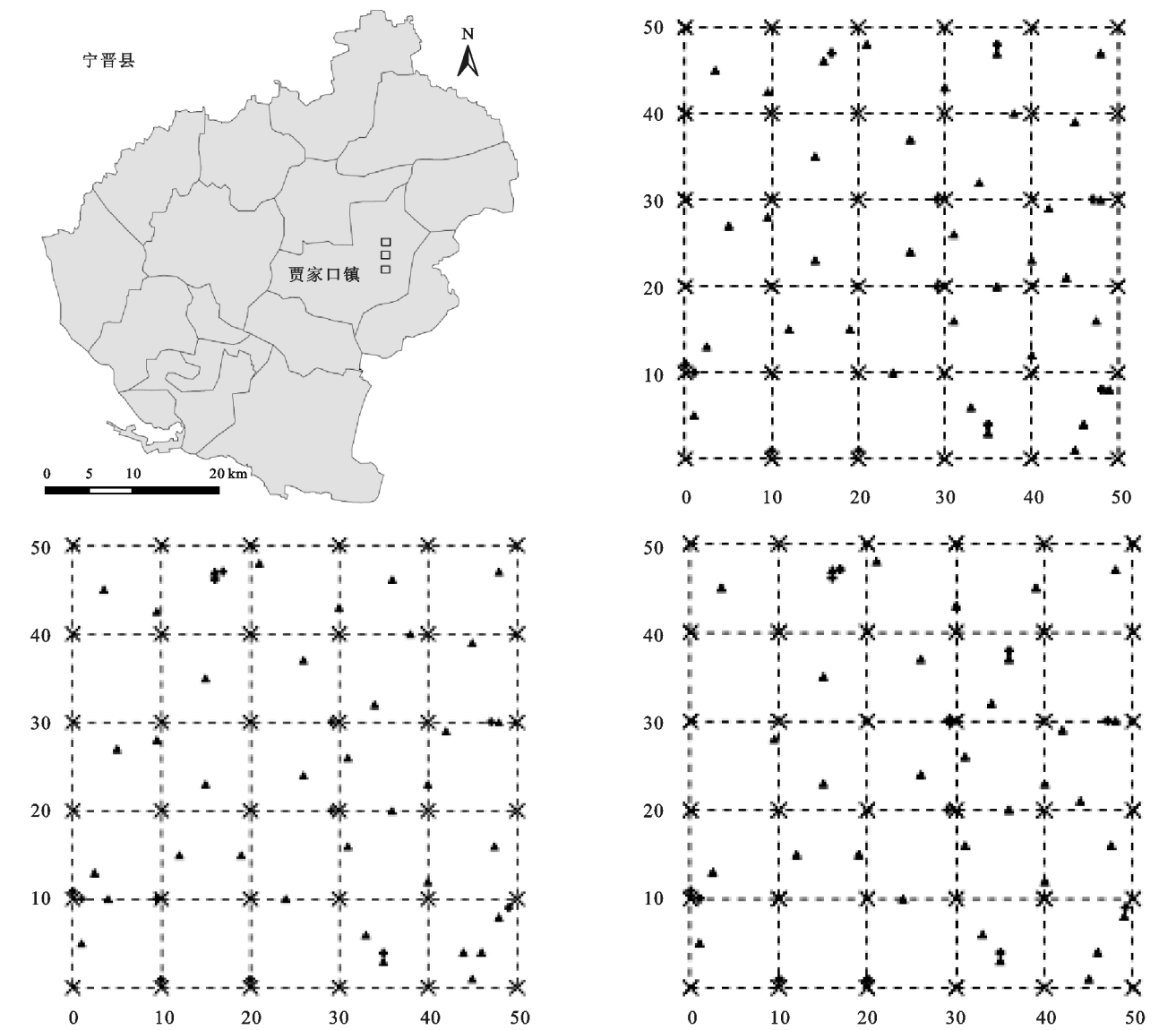
在本研究中,为探究不同土地利用方式下,土壤呼吸的空间格局以及确定哪些土壤环境指标能够在一定程度上辅助于土壤呼吸空间异质性的精确预测,选取黄淮海平原北部典型耕地、草地和林地,进行优化布点,采用普通克里金法和基于辅助变量的协同克里金法做插值分析,以探究:(1) 不同土地利用方式下土壤呼吸的空间变异特征;(2) 与普通克里金法相比,协同克里金法是否可提高土壤呼吸空间变异的预测精度。拟为今后研究不同土地利用方式下的土壤呼吸空间变异特征及精准预测区域碳收支提供数据支撑和理论依据。

1 研究区概况

耕地、草地、林地 3 种土地利用类型的研究样区均

在河北省邢台市宁晋县贾家口镇域(114°46′—115°15′E, 37°24′—37°48′N)范围内,位于黄淮海平原北部,太行山东麓的冲积平原上(图 1)。研究区地势低平,属于暖

温带大陆性气候区,年均气温约为 13℃,年均降水量为 450 mm。每年 4 月中下旬到 10 月上旬为无霜期,霜期 160 d 左右,研究样区土壤类型主要为潮土。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2020)4619 号的标准地图制作,底图未做修改。

图 1 研究区采样点分布示意图

Fig. 1 Distribution diagram of sampling points in the study area

2 材料与方法

2.1 采样点设计

在耕地、草地和林地分别设置 50 m×50 m 的样方,基于 6×6 单元规则网格顶点设置规则网格样点 36 个(用×表示样点),辅以完全随机样点(用▲表示样点)和短距离样点(用+表示样点)的优化布点方案进行采样点设计(图 1)。

耕地、草地和林地采样点总数分别为 82 个、83 个和 79 个,其中短距离样点均为 12 个。短距离样点的设置方法为随机选取 1 个已布设样点,设置在随机方向上与该点距离为 δ 的点作为短距离样点^[14-15]。

公式为:

$$\delta = \frac{1}{5} \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i \tag{1}$$

式中:n 为研究区采样点个数;L 为每一个采样点与其最近采样点的距离,本研究中 δ=4 m。

采样点密度越大、间距越小,短距离样点增加到 10%时,可提升空间预测精度,有利于预测小尺度范围内空间异质性和可靠性^[14-15]。采用 S 型多点混合采样法,取土壤样品深度为 0—20 cm,将土样充分混匀,然后用四分法从混合后的土壤中留取 500 g 样品,除去砾石、根系、生物尸体等影响因素,经风干、研磨之后过筛装袋保存以待测定。

2.2 测定方法

2.2.1 土壤呼吸 于2018年9月夏玉米成熟期,放置LI8100测量室的PVC环(长10 cm,内径0.194 m),埋设深度为5 cm,以减少对表层土壤的扰动。测定前24 h剪除环内杂草,选取天气晴朗的上午,于9:00—11:00采用LI8100进行土壤呼吸速率测定,同时测定5 cm,10 cm土壤温度和5 cm土壤水分含量。

2.2.2 其他指标 土壤有效磷含量用钼锑抗比色法测定,土壤速效钾含量用乙酸铵浸提-火焰光度法测定,土壤全氮含量用凯氏定氮法测定,土壤pH值用电极电位法测定,土壤有机质含量用重铬酸钾-外加热法测定,土壤有机碳含量根据土壤有机质含量计算得来。转化公式为:

$$\text{SOC} = \text{SOM} / 1.724 \quad (2)$$

式中: SOC为土壤有机碳含量(g/kg); SOM为土壤有机质含量(g/kg); 1.724为van bemmelen因数。

2.3 半方差函数

2.3.1 普通克里金 半方差函数用于研究对象空间相关性,主要是在一维条件下,当采样点 x 在一维轴 x 轴上变化时,区域变量 $y(h)$ 在点 x_i 和 (x_i+h) 处的值为 $y(x_i)$ 与 $y(x_i+h)$ 差的1/2,定义为区域变量 $y(x)$ 在 x 轴上的变异函数,记为 $y(x, h)$ 。公式为:

$$y(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i+h) - z(x_i)]^2 \quad (3)$$

式中: h 为变程; $N(h)$ 为以距离 h 为间距的实测对数; $Z(x_i)$ 为样点 x_i 处实测值。

2.3.2 协同克里金 协克里金法中使用的交叉半变异函数描述属性的空间变异性^[3],传统的交叉半变异函数只有一个次级变量。公式为:

$$y_1(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{ [z_1(x_i+h) - z_1(x_i)] [z_2(x_i+h) - z_2(x_i)] \} \quad (4)$$

式中: y_1 为交叉半变异函数; h 为变程; N 为给定滞后距离区间 (X_i+h) 中 $Z_1(X_i)$ 和 $Z_2(X_i)$ 的个数。

基台值 (C_0+C) 、块金值 (C_0) 和变程 (h) 是半方差函数的参数,其中基台值表示变量在空间上的总变异大小,块金值表示随机因素引起的空间变异,变程反映空间变异的范围^[16]。块金值与基台值的比值,即 $C_0/(C_0+C)$,为块金系数。当块金系数小于25%时,空间相关性最强;其值处于25%~75%,即为空间相关性中等;其值大于75%,则空间相关性较弱。

变异系数(CV)可反映土壤特性的空间变异性程度^[17]。当 $CV \leq 0.1$ 时为弱变异, $0.1 < CV < 1$ 时为中等变异, $CV \geq 1$ 时为强变异。

2.4 空间插值方法

2.4.1 普通克里金法 克里金插值是一种基于变差

函数理论和结构分析的有限区域内区域变量无偏最优估计方法。公式为:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (5)$$

式中: $Z(x_0)$ 为位置 x_0 的估计值; $z(x_i)$ 为位置 x_i 的已知值; λ_i 为与数据相关的权重值。

2.4.2 协同克里金法 协同克里金法是普通克里金法的扩展应用,它利用了多种变量类型,将主变量的自相关和协同变量的互相关联结合在一起进行无偏最优估计。公式为:

$$Z_1(x_0) = \sum_{i=1}^{n_1} \lambda_i z_1(x_i) + \sum_{i=1}^{n_2} \mu_i z_2(x_i) \quad (6)$$

式中: $Z_1(x_0)$ 为 x_0 点的估计值; $z_1(x_i)$ 为初始变量 x_i 的真实值; $z_2(x_i)$ 为同位二级变量 x_i 的真实值; λ_i 为与 $z_1(x_i)$ 相关的权重; μ_i 为与 $z_2(x_i)$ 相关的权重; n_1 和 n_2 分别为 z_1 和 z_2 的邻域个数。

2.5 精度评价

评价指标: 平均绝对误差(MAE)、平均相对误差(MRE)、均方根误差(RMSE)和平均标准误差(MSE)。平均绝对误差确切地表示偏离真值的实际大小,平均相对误差反映模拟的可信程度,均方根误差反映模拟值的灵敏度和极值效应,平均标准误差表示样本均值与总体均值的离散程度。误差越小,效果越好。计算公式如下:

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_{oi} - z_{pi}| \quad (7)$$

$$\text{MRE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{z_{oi} - z_{pi}}{z_{oi}} \right| \quad (8)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_{oi} - z_{pi})^2} \quad (9)$$

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_{oi} - z_{pi})^2 \quad (10)$$

式中: z_{oi} 与 z_{pi} 分别为土壤呼吸的实测值与预测值; n 为样本数量。

2.6 数据处理

应用Microsoft Excel 2010计算均值、标准差,最大(小)值。SPSS 24.0做描述统计, K-S正态分布检验。Origin 2021制作相关性图。GS⁺(9.0)软件完成半方差函数模型拟合。ArcGIS 10.7软件做空间插值、误差验证。

3 结果与分析

3.1 土壤指标统计特征

统计分析表明,耕地、草地和林地土壤呼吸速率的变化范围依次是1.08~3.54, 1.75~6.35, 0.50~3.77 $\mu\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ (表1)。耕地、草地和林地土壤呼吸速率均

呈现中等程度变异,变异系数依次为 33%,24%,31%。

土壤全氮、有效磷和速效钾含量在耕地,平均值分别为 2.18 g/kg,39.59 mg/kg,319.94 mg/kg(表 1)。大气温度、5 cm 和 10 cm 土壤温度及土壤水分也表现为耕地最高,平均值依次为 16.71℃,19.33℃,16.92℃,14%。土壤有机碳含量、pH 值、C/N 值在草地最高,平均值依次为 10.99 g/kg,8.21,19.39。N/P 和 C/P 在林地最高,平均值依次为 0.09,1.55。3 种土地利用方式下,大气温度、5 cm 和 10 cm 土壤温度及土壤 pH 值均表现为弱变异(仅耕地 ST₁₀ 和林地 TEMP 除外)。土壤水分、土壤有机碳、土壤养分及其相关化学计量学指标在耕地、草地和林地均呈现中等程度变异,其中变异最大的指标均为 N/P,变异系数依次为 50%,60%,67%。

表 1 土壤基本指标统计
Table 1 Soil basic index statistics

土地利用方式	指标	土壤呼吸/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有机碳/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	pH 值	C/N	N/P	C/P	5 cm 土壤 温度/℃	10 cm 土壤 温度/℃	大气 温度/℃	土壤 水分/%
耕地	最小值	1.08	0.66	20.15	156.30	5.70	7.91	2.45	0.01	0.08	15.10	12.00	14.50	3.00
	最大值	3.54	2.90	75.10	471.30	10.53	8.16	5.31	0.13	0.43	18.60	24.00	20.20	29.0
	平均值	1.97	2.18	39.59	319.94	7.66	8.08	3.48	0.06	0.22	16.71	19.33	16.92	14.0
	标准差	0.65	0.51	14.40	73.49	0.96	0.05	0.69	0.03	0.08	0.77	2.91	1.34	6.00
	偏度	0.73	-0.82	0.64	-0.13	1.07	-1.18	2.78	0.46	0.97	0.42	-0.52	0.36	28.0
	峰度	-0.38	0.83	-0.47	-0.64	2.33	2.86	9.56	-0.42	1.63	-0.12	-0.13	-0.68	-26.0
	CV/%	33	23	36	23	13	1	20	50	35	5	15	8	42
草地	最小值	1.75	0.30	4.80	127.60	7.21	8.08	11.03	0.01	0.29	10.40	11.80	13.00	4.00
	最大值	6.35	0.93	32.80	251.80	14.25	8.31	36.56	0.14	1.54	15.00	14.90	17.00	22.0
	平均值	3.96	0.60	13.82	189.04	10.99	8.21	19.39	0.05	0.87	12.88	13.33	14.60	13.0
	标准差	0.96	0.17	5.52	26.38	1.35	0.04	6.15	0.03	0.26	1.15	0.71	1.42	4.00
	偏度	0.38	-0.83	1.13	0.07	3.65	-0.50	0.70	0.64	1.31	0.04	-0.02	0.64	-31.0
	峰度	0.37	0.43	1.13	-0.29	18.18	1.30	1.68	0.90	2.81	-0.87	-0.50	-0.81	-22.0
	CV/%	24	28	40	14	12	0	32	60	30	9	5	10	28
林地	最小值	0.50	0.41	1.54	171.90	4.92	8.03	5.10	0.01	0.36	12.30	12.50	13.00	1.00
	最大值	3.77	1.10	20.62	382.30	15.93	8.24	35.31	0.26	4.20	16.20	15.70	18.00	15.0
	平均值	2.01	0.62	8.53	261.58	10.24	8.12	17.50	0.09	1.55	14.44	14.45	15.27	7.00
	标准差	0.63	0.18	4.65	49.05	3.76	0.05	8.97	0.06	1.04	0.73	0.59	1.84	3.00
	偏度	0.90	1.06	1.44	0.81	-1.78	-1.18	-0.38	1.50	1.18	-0.16	8.76	0.34	47.0
	峰度	2.57	0.51	3.20	0.34	2.67	4.62	-0.22	2.69	1.53	0.51	76.76	-1.33	-22.0
	CV/%	31	29	55	19	37	1	51	67	67	5	4	12	48

注:SR 为土壤呼吸;AP 为有效磷;AK 为速效钾;TN 为全氮;SOC 为有机碳;C/N 为碳氮比;N/P 为氮磷比;C/P 为碳磷比;ST5 为 5 cm 土壤温度;ST10 为 10 cm 土壤温度;TEMP 为气温;SM 为土壤水分。

3.2 土壤呼吸半方差和交叉变异函数

基于普通克里金法的半方差函数,在耕地和草地中为球面模型,林地中为指数模型(图 2)。耕地和草地土壤呼吸均呈现强空间相关性,块金系数均小于 3%,而林地土壤呼吸则呈现中等程度的空间相关性,块金系数为 40%。土壤呼吸空间相关距离由远及近依次为林地(15.12 m)、耕地(3.83 m)和草地(2.47 m),这表明在区域范围内,林地土壤呼吸具有更远距离的空间相关性。

基于协同克里金法的研究表明耕地和草地土壤呼吸均为稳定模型,林地则是球状模型(表 2)。土壤呼吸与辅助变量的交叉变异分析表示耕地、草地和林地的土

壤呼吸与辅助变量之间都具有强空间相关性。仅耕地土壤中 pH 值与土壤呼吸的空间相关性较弱(图 3)。

3.3 土壤呼吸空间分布格局

基于普通克里金与协同克里金插值法预测的土壤呼吸空间分布格局大体保持一致,与普通克里金法相比,协同克里金法插值结果所表达的土壤呼吸空间格局在细节上更加准确、丰富,土壤呼吸高低峰值空间分布更加清晰(图 4)。耕地土壤呼吸均呈现条带状,空间格局表现为四周高中部低。草地土壤呼吸空间分布均呈现不规则斑状,空间格局是以东北—西南为轴的对称分布。林地土壤呼吸空间分布均呈现明显的嵌套状,格局是自西向东逐渐增大。

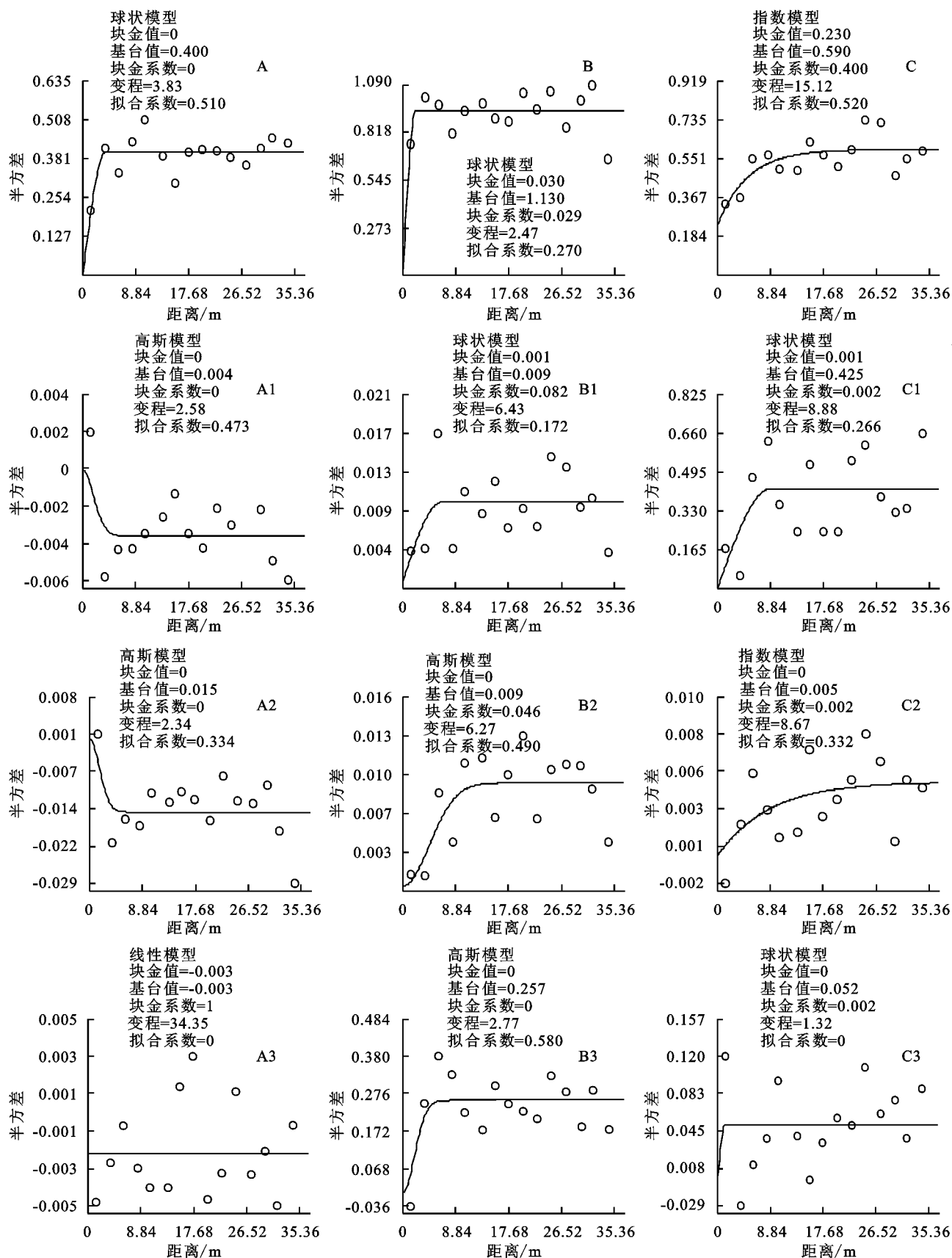


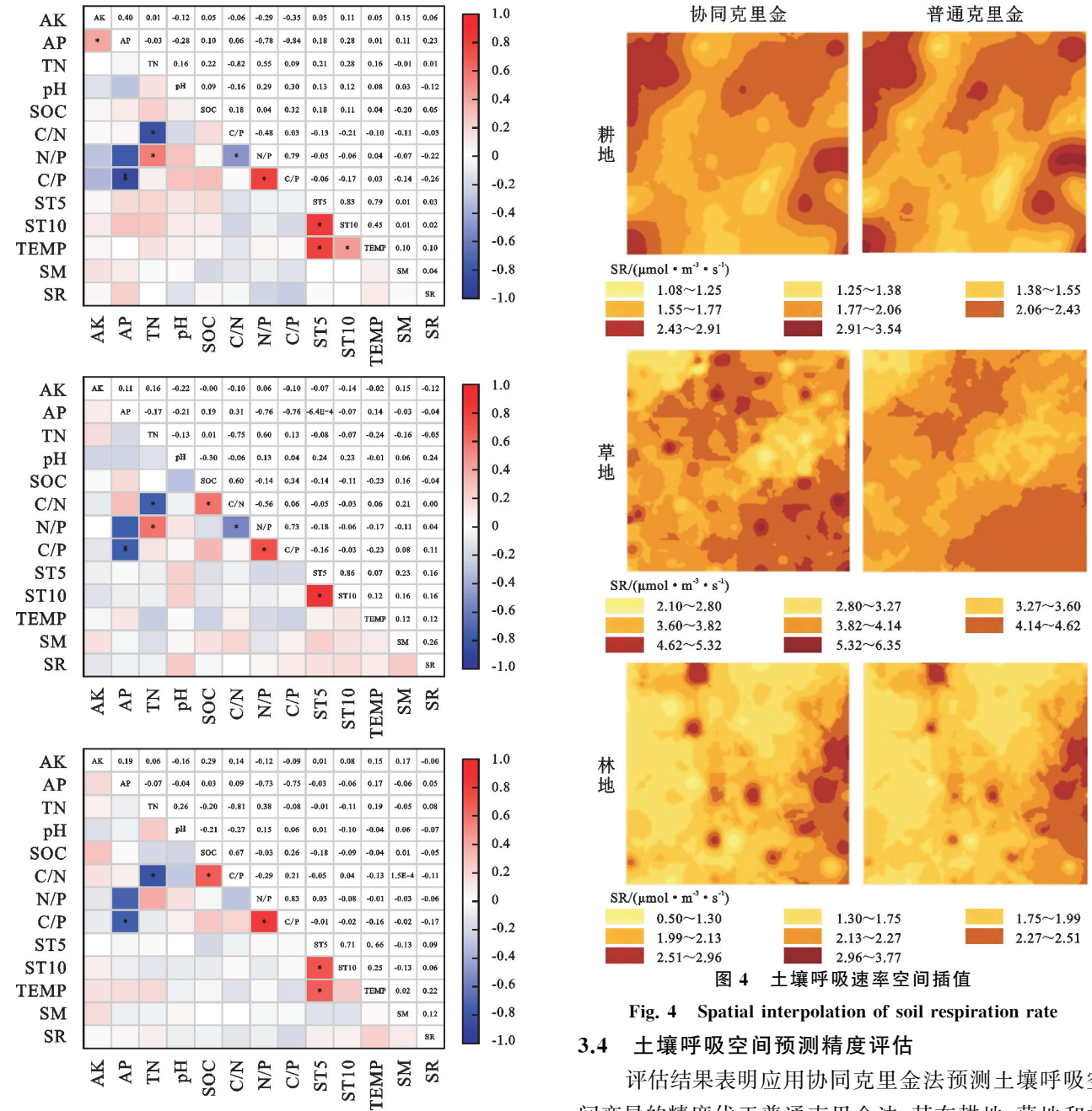
图2 土壤呼吸与协同变量的交叉变异函数

Fig. 2 Cross variogram of soil respiration and covariance variables

表 2 土壤呼吸插值模型误差

Table 2 Error of soil respiration interpolation model

土地利用方式	插值方法	辅助变量	最优模型	回归方程	样点数量/个	MAE	MRE	RMSE	MSE
耕地	普通克里金	C/P, N/P, pH	球状	$0.147x + 1.618$	82	0.523	0.284	0.669	0.631
	协同克里金		稳定	$0.125x + 1.704$	82	0.517	0.280	0.641	0.591
	提升精度/%					1.15	1.41	4.19	6.34
草地	普通克里金	SM, pH, ST5	球状	$0.022x + 3.975$	83	0.838	0.224	1.055	1.086
	协同克里金		稳定	$0.064x + 3.741$	83	0.753	0.202	0.959	0.968
	提升精度/%					10.14	9.82	9.10	10.87
林地	普通克里金	TEMP, SM, ST5	指数	$0.344x + 1.370$	79	0.481	0.306	0.669	0.614
	协同克里金		球状	$0.496x + 1.010$	79	0.458	0.269	0.635	0.555
	提升精度/%					4.78	12.09	5.08	9.61



注:红色数字表示正相关;蓝色数字表示负相关;* 代表 $p < 0.05$; ** 代表 $p < 0.01$; *** 代表 $p < 0.001$ 。

图 3 土壤呼吸与因子相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis of soil respiration and factors

Fig. 4 Spatial interpolation of soil respiration rate

3.4 土壤呼吸空间预测精度评估

评估结果表明应用协同克里金法预测土壤呼吸空间变异的精度优于普通克里金法,其在耕地、草地和林地依次平均提升了 3.27%,9.98%,7.86%(表 2)。基于 MAE,MRE,RMSE 和 MSE 的预测精度评估表明,与普通克里金法相比,协同克里金法的土壤呼吸空间变异预

测精度在耕地提高 1.15%~6.34%,在草地提高 9.10%~10.87%,在林地提高 4.78%~12.09%(表 2)。

4 讨论

4.1 不同土地利用方式下土壤呼吸异同

本研究发现,草地土壤呼吸速率较耕地和林地更高,这与前人的研究结果相一致^[18-19]。Raich 等^[20]研究认为草地土壤呼吸速率大于耕地和林地,其指出土壤呼吸速率与不同土地利用方式下植被的差异密切相关,植被能通过影响土壤微生物、土壤有机质、土壤结构和根呼吸来影响土壤呼吸总量。有机物提供异养分解的基质^[21],土壤有机碳含量作为环境背景值的重要参数,在一定程度上起到调节土壤呼吸作用。土壤有机碳储量越大的生态系统,土壤呼吸速率相对越高,因此研究样区中草地土壤呼吸速率比耕地和林地都更高。

4.2 辅助变量选取

选取辅助变量主要根据相关性和协同克里金模拟效果,辅助变量与土壤呼吸的相关性越大,预测效果越优^[7]。耕地、草地和林地土壤呼吸速率均与温度(ST5,ST10,TEMP)和土壤水分呈现一定相关性(图 3),即土壤呼吸速率随着温度或水分的升高而变大,这与前人研究结果相一致^[17]。

草地和林地土壤呼吸的辅助变量除共有的土壤水分和 5 cm 土壤温度外,林地的辅助变量还有气温,其与林地土壤呼吸呈显著正相关关系($p < 0.01$)。耕地土壤呼吸的最优辅助变量中并未出现土壤温度和土壤水分指标,而是 C/P、N/P 和土壤 pH 值,这可能与耕地长期施用有机肥、氮磷肥等措施有关,致使磷成为耕地土壤呼吸主导因子。孙宝玉等^[13]研究表明施磷改变土壤 N/P,土壤 pH 值等理化指标,土壤中氮未受限制时,适量磷添加使植被更容易获取土壤磷素,相应地减少植物根系向地下的扩展,因此施磷引起的土壤 N/P 降低限制了植物根系呼吸。此外,施磷后凋落物碎屑、根系分泌物等有机碳输入数量和品质的变化,从而导致 C/P 改变,进而影响土壤呼吸^[22]。耕地中土壤 pH 值提升,通过改变土壤酶空间构象来影响酶催化活性,显著影响土壤酶对碳底物的分解,来调控土壤呼吸^[23]。因此,在耕地中,N/P、C/P 和土壤 pH 值为土壤呼吸空间变异的辅助变量。

4.3 预测精度评估

基于协同克里金法插值表达的土壤呼吸空间变异优于普通克里金法,可能归结于辅助变量对土壤呼吸空间变异的解释作用。与普通克里金法相比,协同

克里金法的土壤呼吸预测在草地和林地中的 MRE 分别提升 9.82%,12.09%,这与阳宽达等^[24]研究结果相一致。胡丹桂等^[25]采用 RMSE 作为评价指标,在空气湿度空间插值研究表明协同克里金法预测精度提升 7.66%~20.58%。本研究中,RMSE 提升 4.19%~9.10%,与前人研究结果较为一致^[25-26]。有研究表明,当主辅变量间的相关性超过 0.45 时,协同克里金法的预测精度明显优于普通克里金法^[5],能够表达更为丰富的空间信息。而本研究中没有指标与土壤呼吸相关系数超过 0.45,这可能是没有前人研究中精度提升那么高的重要原因,这值得进一步探究。

5 结论

(1) 不同土地利用方式下土壤呼吸均呈现中等程度变异,平均速率由大到小依次为草地 $3.96 \mu\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 、林地 $2.01 \mu\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 和耕地 $1.97 \mu\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。在空间自相关方面,空间相关距离呈现林地>耕地>草地,分别为 15.12,3.83,2.47 m。

(2) 本研究应用协同克里金法模拟土壤呼吸空间变异的最优辅助变量在耕地为 C/P、N/P、pH 值,在草地为 SM、pH 值、ST5,在林地为 TEMP、SM、ST5。与普通克里金法预测相比,引入辅助变量的协同克里金法插值对耕地、草地、林地土壤呼吸空间变异预测精度的提升可达 9.98%。因此,以土壤呼吸的影响因子作为辅助变量的协同克里金法可以更准确地预测区域土壤呼吸的空间变异特征。

参考文献(References):

- [1] 王猛,李贵才,王军邦.典型草原通量塔通量贡献区地上生物量和叶面积指数的时空变异[J].应用生态学报,2011,22(3):637-643.
Wang M, Li G C, Wang J B. Spatiotemporal variations of aboveground biomass and leaf area index of typical grassland in tower flux footprint[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011,22(3):637-643.
- [2] Cambule A H, Rossiter D G, Stoorvogel J J, et al. Soil organic carbon stocks in the Limpopo National Park, Mozambique: Amount, spatial distribution and uncertainty[J]. Geoderma, 2014,213:46-56.
- [3] Mirzaee S, Ghorbani-Dashtaki S, Mohammadi J, et al. Spatial variability of soil organic matter using remote sensing data[J]. Catena, 2016,145:118-127.
- [4] Wu C F, Wu J P, Luo Y M, et al. Spatial estimation of soil total nitrogen using cokriging with predicted soil organic matter content[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009,73(5):1676-1681.

- [5] Golden N, Zhang C S, Potito A, et al. Use of ordinary cokriging with magnetic susceptibility for mapping lead concentrations in soils of an urban contaminated site[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(3):1357-1370.
- [6] 王汉东, 黄臻瑶, 朱思蓉, 等. 三峡区间面雨量空间插值方法对比分析[J]. *水利信息化*, 2021(1):26-29.
Wang H D, Huang L Y, Zhu S R, et al. Intercomparison of area rainfall spatial interpolation in Sanxia Region[J]. *Water Resources Informatization*, 2021(1):26-29.
- [7] 高文武, 姜燕, 赵晋陵. 基于协同克里金插值法的土壤锰元素含量预测[J]. *地理与地理信息科学*, 2018, 34(3):119-124.
Gao W W, Jiang Y, Zhao J L. Predicting and mapping the Mn content in soil based on cokriging[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2018, 34(3):119-124.
- [8] 王雪婷. 基于协同克里金算法土壤表层 CO₂ 浓度时空分布动态研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.
Wang X T. Temporal and Spatial Dynamic Variation Characteristics of Soil Surface CO₂ Concentration Based on Coordinating Kriging Algorithm [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2019.
- [9] ArchMiller A A, Samuelson L J, Li Y R. Spatial variability of soil respiration in a 64-year-old lingleaf pine forest[J]. *Plant and Soil*, 2016, 403(1/2):419-435.
- [10] 周泉, 王龙昌, 熊瑛, 等. 绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响[J]. *环境科学*, 2016, 37(3):1114-1120.
Zhou Q, Wang L C, Xiong Y, et al. Effects of green manure intercropping and straw mulching on winter rape rhizosphere soil organic carbon and soil respiration [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(3):1114-1120.
- [11] 王涵, 王果, 黄颖颖, 等. pH 变化对酸性土壤酶活性的影响[J]. *生态环境*, 2008, 17(6):2401-2406.
Wang H, Wang G, Huang Y Y, et al. The effects of pH change on the activities of enzymes in an acid soil [J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(6):2401-2406.
- [12] Feng J G, Zhu B. A global meta-analysis of soil respiration and its components in response to phosphorus addition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 135:38-47.
- [13] 孙宝玉, 韩广轩. 模拟增温对土壤呼吸影响机制的研究进展与展望[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(10):3394-3402.
Sun B Y, Han G X. Research and prospects for response mechanisms of soil respiration to experimental warming [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(10):3394-3402.
- [14] 谢梦姣, 陈奇乐, 张俊梅, 等. 短距离样点对土壤呼吸空间变异预测精度的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(3):421-428.
Xie M J, Chen Q L, Zhang J M, et al. Effects of short distance sampling on the prediction accuracy of the spatial variability of soil respiration [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(3):421-428.
- [15] Lark R M, Marchant B P. How should a spatial-coverage sample design for a geostatistical soil survey be supplemented to support estimation of spatial covariance parameters[J]. *Geoderma*, 2018, 319:89-99.
- [16] 吴炳孙, 冯家东, 王晶晶, 等. 橡胶单作与间作种植模式土壤水分的空间变异性研究[J]. *热带农业工程*, 2022, 46(1):1-6.
Wu B S, Feng J D, Wang J J, et al. Spatial variability of soil moisture in rubber plantation under monocropping and intercropped cropping patterns [J]. *Tropical Agricultural Engineering*, 2022, 46(1):1-6.
- [17] 王绍强, 朱松丽, 周成虎. 中国土壤土层厚度的空间变异性特征[J]. *地理研究*, 2001, 20(2):161-169.
Wang S Q, Zhu S L, Zhou C H. Characteristics of spatial variability of soil thickness in China [J]. *Geographical research*, 2001, 20(2):161-169.
- [18] 王祥, 朱亚琼, 郑伟, 等. 昭苏山地草甸 4 种典型土地利用方式下的土壤呼吸特征[J]. *植物生态学报*, 2018, 42(3):382-396.
Wang X, Zhu Y Q, Zheng W, et al. Soil respiration features of mountain meadows under four typical land use types in Zhaosu Basin [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(3):382-396.
- [19] 刘丽雯, 刘梦云, 吴健利, 等. 黄土台塬不同土地利用方式下土壤呼吸季节性变化及影响因素[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(12):1819-1828.
Liu L W, Liu M Y, Wu J L, et al. Seasonal variation of soil respiration and affecting factors under different land use types in the tablelands of the Loess Plateau [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(12):1819-1828.
- [20] Raich J W, Tufekciogul A. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1):71-90.
- [21] 刘惠, 赵平, 林永标, 等. 华南丘陵区不同土地利用方式下土壤呼吸[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(12):2021-2027.
Liu H, Zhao P, Lin Y B, et al. Soil respiration under different land-use types in a hilly area of South China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12):2021-2027.

- Han X S, Wang Y H, Yu P T, et al. Temporal and spatial variation and influencing factors of soil moisture in *Larix principis-rupprechtii* plantation in semiarid Liupan Mountains, Northwest China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(1): 111-117.
- [27] 吴芹芹, 莫淑红, 程圣东, 等. 黄土区冻融期不同土地利用土壤水分与温度的关系 [J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 627-635.
- Wu Q Q, Mo S H, Cheng S D, et al. Study on the correlation between soil moisture and temperature of different land uses in the loess area during a freezing-thawing period [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 627-635.
- [28] 程文举, 席海洋, 司建华, 等. 内陆河流域浅山区土壤水热时空动态及其对气象因子的响应 [J]. 高原气象, 2022, 41(6): 1435-1445.
- Cheng W J, Xi H Y, Si J H, et al. Temporal and spatial dynamic change of soil water-heat and its response to meteorological factors in an inland river basin in low coteau area [J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(6): 1435-1445.
- [29] 杨志辉, 赵军, 朱国锋, 等. 顾及植被覆盖影响的石羊河流域土壤水分遥感估算及空间格局分析 [J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8826-8837.
- Yang Z H, Zhao J, Zhu G F, et al. The remote sensing estimation and spatial pattern analysis of soil moisture in the Shiyang River Basin in consideration of vegetation cover affect [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8826-8837.
- [30] 李浙华, 李生字, 李丙文, 等. 不同植被覆盖度沙垄土壤化学性质的空间分异 [J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 160-167.
- Li Z H, Li S Y, Li B W, et al. Spatial variation of soil chemical properties of longitudinal dunes with different vegetation coverage levels [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 160-167.
- [31] Yuan X L, Li L H, Chen X, et al. Effects of precipitation intensity and temperature on NDVI-based grass change over Northern China during the period from 1982 to 2011 [J]. Remote Sensing, 2015, 7(8): 10164-10183.
- [32] Rao W B, Chen X, Meredith K T, et al. Water uptake of riparian plants in the lower Lhasa River Basin, South Tibetan Plateau using stable water isotopes [J]. Hydrological Processes, 2020, 34(16): 3492-3505.
- [33] 朱飙, 张强, 李春华, 等. 我国干旱半干旱区气候变化特征及其对干湿波动的影响 [J]. 大气科学学报, 2023, 46(1): 42-54.
- Zhu B, Zhang Q, Li C H, et al. Characteristics of climate change in arid and semi-arid areas of China and its influence on climatic dry-wet fluctuation [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2023, 46(1): 42-54.

(上接第 109 页)

- [22] Meyer N, Welp G, Rodionov A, et al. Nitrogen and phosphorus supply controls soil organic carbon mineralization in tropical topsoil and subsoil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 119: 152-161.
- [23] 张星星, 杨柳明, 陈忠, 等. 中亚热带不同母质和森林类型土壤生态酶化学计量特征 [J]. 生态学报, 2018, 38(16): 5828-5836.
- Zhang X X, Yang L M, Chen Z, et al. Patterns of eco-enzymatic stoichiometry on types of forest soils from different parent materials in subtropical areas [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(16): 5828-5836.
- [24] 阳宽达, 谢红霞, 隋兵, 等. 基于 GIS 的降雨空间插值研究: 以湖南省为例 [J]. 水土保持研究, 2020, 27(3): 134-138, 145.
- Yang K D, Xie H X, Sui B, et al. Research on spatial interpolation of rainfall based on GIS: A case study of Hunan Province [J]. Research of Soil and Water Conservation Research, 2020, 27(3): 134-138, 145.
- [25] 胡丹桂, 舒红. 基于协同克里金空气湿度空间插值研究 [J]. 湖北农业科学, 2014, 53(9): 2045-2049.
- Hu D G, Shu H. Air humidity based on CoKriging interpolation [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2014, 53(9): 2045-2049.
- [26] 赵业婷, 常庆瑞, 李志鹏, 等. 基于 Cokriging 的耕层土壤全氮空间特征及采样数量优化研究 [J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 415-422.
- Zhao Y T, Chang Q R, Li Z P, et al. Study on spatial distribution of total nitrogen in arable soil layer and optimization of number of soil samples for the study based on Cokriging [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(2): 415-422.