

排土场不同复垦模式土壤生态化学计量特征

刘宝勇¹, 潘琪^{1*}, 甄博琚¹, 何志勇²

(1. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁阜新 123000; 2. 阜新市林业发展服务中心, 辽宁阜新 123000)

摘要 以阜新海州露天矿排土场4种复垦模式(刺槐纯林、白榆纯林、刺槐白榆混交林和草地)的土壤为研究对象,分析C、N、P含量及化学计量特征在复垦模式间的差异。结果表明,土壤C、N、P含量为67.89、0.43、0.51 g/kg。4种复垦模式土壤C含量丰富,土壤N含量极为缺乏,土壤P含量较为缺乏。刺槐白榆混交林土壤C、N、P含量高于刺槐纯林、白榆纯林,混交林地比纯林具有更积极的养分累积作用。土壤C含量与土壤P含量呈极显著正相关,土壤C、P含量与土壤C:N呈显著负相关,土壤N:P<10。在海州露天矿排土场4种复垦模式土壤中要提高氮的供给,以利于植被恢复。

关键词 生态化学计量;土壤;露天矿排土场;复垦模式

中图分类号 S153 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2022)21-0081-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.21.020



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Soil Ecological Stoichiometry Characteristics of Different Reclamation Modes in Dump

LIU Bao-yong, PAN Qi, ZHEN Bo-jun et al (College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000)

Abstract Taking the soil of four reclamation modes (*Robinia pseudoacacia* pure forest, *Ulmus pumila* pure forest, *Robinia pseudoacacia-Ulmus pumila* mixed forest and grassland) in Fuxin Haizhou open-pit mine dump as the research object, the differences of C, N, P contents and stoichiometric characteristics among the reclamation modes were analyzed. The results showed that the contents of C, N and P in soil were 67.89, 0.43 and 0.51 g/kg. The soil C content was rich in the four reclamation modes, but the soil N content was extremely short, and the soil P content was relatively short. The soil C, N and P contents of *Robinia pseudoacacia-Ulmus pumila* mixed forest were higher than those of *Robinia pseudoacacia* pure forest and *Ulmus pumila* pure forest, and the mixed forest had more positive nutrient accumulation effect than the pure forest. Soil C content and soil P content were extremely significantly positively correlated, and soil C and P contents were significantly negatively correlated with soil C:N, and soil N:P<10. In order to facilitate vegetation restoration, nitrogen supply should be improved in the soil of four reclamation modes in the dump of Haizhou open-pit mine.

Key words Ecological stoichiometry; Soil; Open-pit mine dump; Reclamation mode

生态化学计量学是将生物学、化学、物理学的基本原理统合起来,并在化学元素的生态过程中研究其数量关系。它把生态学中各种研究的理论有机地结合到一起,提供了研究元素化学循环与过程中的计量关系和规律的方法,主要强调元素的化学计量特征关系。近年来生态化学计量的研究逐渐成为热点,王绍强等^[1]分析了生态系统中C、N和P元素之间的相互关系,研究了元素之间的平衡与生态的相互作用和影响。土壤生态化学计量研究可以较为直观地阐明土壤养分的限制性因素,所以,为了更好地理解生态系统中的养分循环及其限制因子,就要从土壤的化学计量入手。

目前土壤的化学计量研究主要集中在森林系统^[2-3],关于矿区排土场退化生态系统的研究还很少。阜新海州露天矿排土场作为人为破坏后简单修复的退化生态系统,利用化学计量学对排土场主要的4种复垦模式[刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)纯林、白榆(*Ulmus pumila* L.)纯林、刺槐白榆混交林和草地]的土壤进行研究,研究其养分变化及相互关系进而更好地理解C、N、P潜在的生态学过程和影响机理,对于掌握排土场生态系统修复过程中养分循环及限制因素具有重要意义,为阜新海州露天矿排土场植被恢复与重建提供理论与实践指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 阜新市海州露天矿排土场位于121°39'25"E、41°57'22"N,东西长7 km,南北宽3 km,占地16 km²,海拔240.7 m。温带半干旱大陆性季风气候,春季干旱多以风沙天气为主,夏季高温,秋季温度适宜,早晚温差较大,冬季干冷,降雪较少。降水集中于7、8、9月,年平均降水量为500 mm左右,蒸发量约为降水量的4倍。无霜期156 d左右,冻结深度1.4 m左右。

海州露天矿排土场复垦地区土壤条件极差,属于地带性土壤,主要是由不同类型的岩石风化物残积母质、黄土以及红土母质上的淋溶褐土、褐土性土组成,土壤厚度薄、营养成分低。经过一系列的修复工作,环境得到了一定的改善,栽植适应性强、抗逆性强、根系发达、生长快、能有效改良土壤、播种栽植简单、成活率高的植物。

1.2 样品采集 该研究于2021年5月在阜新海州露天矿排土场内选择造林年限相同、立地条件相似的刺槐纯林、白榆纯林、刺槐白榆混交林和草地复垦区作为研究区,在每个研究区内设置10 m×10 m的样方,采用“S布点法”在样方中选择5个样点,除去表层的枯落物层,然后按0~10、10~20、20~30 cm分层,将收集的土壤用“四分法”混合,样品分别压缩到500 g装袋。将土壤样本除去石块、植物残体等杂物,风干,过100目筛(0.149 mm)。

1.3 土壤指标测定方法 土壤C含量采用重铬酸钾容量法-外加热法测定;土壤N含量采用凯式定氮法测定;土壤P

作者简介 刘宝勇(1975—),男,辽宁葫芦岛人,副教授,博士,从事工矿区水土保持及矿山环境工程研究。*通信作者,工程师,硕士,从事生态修复理论与技术研究。

收稿日期 2021-12-30; **修回日期** 2022-02-12

含量采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法^[4]测定。

1.4 数据分析 利用 Excel 软件对试验结果进行整理和计算,利用 SPSS 23 对结果进行方差分析,并利用 Pearson 相关系数对各个因子的相关性进行判定,利用 Origin 2021 软件进行制图。

2 结果与分析

2.1 不同复垦模式土壤 C、N、P 含量 从表 1 可以看出,在刺槐纯林、白榆纯林、刺槐白榆混交林和草地复垦模式下,0~30 cm 土层土壤 C 平均含量分别为 64.87、53.39、147.65、5.65 g/kg,即土壤 C 平均含量从大到小依次为刺槐白榆混交林>刺槐纯林>白榆纯林>草地。刺槐白榆混交林土壤 C 含量在各土层之间无显著差异($P>0.05$)。白榆纯林和草地土壤 C 含量随土层加深而降低($P<0.05$),表层含量最大,出现“表聚”现象。在同一土层深度不同复垦模式中,0~10、10~20 cm 土层中土壤 C 含量各复垦模式之间差异显著($P<0.05$),20~30 cm 土层中白榆纯林和刺槐纯林土壤 C 含量差异不显著($P>0.05$)。在各土层中刺槐白榆混交林土壤 C 含量均显著高于其他复垦模式($P<0.05$),草地土壤 C 含量均显著低于其他复垦模式($P<0.05$)。

在刺槐纯林、白榆纯林、刺槐白榆混交林和草地复垦模式下,0~30 cm 土层土壤 N 平均含量分别为 0.73、0.07、

0.78、0.12 g/kg,即土壤 N 平均含量从大到小依次为刺槐白榆混交林>刺槐纯林>草地>白榆纯林,0~30 cm 土壤 N 含量均值差异不大($P>0.05$)。同一复垦模式不同土层深度中,除白榆纯林、草地外,土壤 N 含量都表现出 0~10 cm 土层显著高于其他土层($P<0.05$)。在 10~20、20~30 cm 土层之间,白榆纯林土壤 N 含量差异显著($P<0.05$),其余复垦模式土壤 N 含量无显著差异($P>0.05$)。在同一土层深度不同复垦模式中,0~10 cm 土层中白榆纯林土壤 N 含量显著低于刺槐纯林和刺槐白榆混交林($P<0.05$),10~20、20~30 cm 土层中刺槐白榆混交林和刺槐纯林土壤 N 含量显著高于白榆纯林和草地($P<0.05$)。

在刺槐纯林、白榆纯林、刺槐白榆混交林和草地复垦模式下,0~30 cm 土层土壤 P 平均含量为 0.54、0.62、0.64、0.24 g/kg,即土壤 P 平均含量从大到小依次为刺槐白榆混交林>白榆纯林>刺槐纯林>草地。同一复垦模式不同土层深度中,土壤 P 含量均无显著差异($P>0.05$)。在同一土层深度不同复垦模式中,0~10、10~20 cm 土层中土壤 P 含量在刺槐纯林、白榆纯林和刺槐白榆混交林之间无显著差异($P>0.05$),20~30 cm 土层中土壤 P 含量白榆纯林和刺槐白榆混交林之间无显著差异($P>0.05$)。

表 1 不同复垦模式土壤 C、N、P 含量

Table 1 Soil C, N and P contents in different reclamation patterns

g/kg

指标 Indices	复垦模式 Reclamation modes	土层 Soil layers//cm			平均值 Average value
		0~10	10~20	20~30	
C	刺槐纯林	69.23±0.42 Cb	80.94±2.00 Ba	44.45±1.87 Bc	64.87±18.63 B
	白榆纯林	78.75±1.23 Ba	44.16±2.77 Cb	37.27±0.94 Bc	53.39±22.23 B
	刺槐白榆混交林	145.51±4.37 Aa	154.34±4.73 Aa	143.11±8.45 Aa	147.65±5.92 A
	草地	7.12±0.18 Da	5.75±0.09 Db	4.07±0.41 Cc	5.65±1.53 C
N	刺槐纯林	1.85±0.71 ABa	0.22±0.06 Ab	0.12±0.02 Ab	0.73±0.97 A
	白榆纯林	0.08±0.01 Ca	0.08±0.01 Ba	0.05±0.01 Bb	0.07±0.02 A
	刺槐白榆混交林	2.05±1.47 Aa	0.17±0.05 Ab	0.13±0.05 Ab	0.78±1.10 A
	草地	0.31±0.32 BCa	0.03±0.01 Ba	0.03±0.01 Ba	0.12±0.16 A
P	刺槐纯林	0.54±0.05 ABa	0.55±0.01 Aa	0.54±0.01 Ba	0.54±0.00 B
	白榆纯林	0.54±0.19 ABa	0.67±0.05 Aa	0.65±0.02 Aa	0.62±0.07 AB
	刺槐白榆混交林	0.62±0.01 Aa	0.65±0.09 Aa	0.66±0.04 Aa	0.64±0.02 A
	草地	0.30±0.02 Ba	0.21±0.00 Ba	0.22±0.05 Ca	0.24±0.05 C

注:同列不同大写字母表示相同元素不同复垦模式间差异显著($P<0.05$),同行不同小写字母表示相同元素不同土层深度差异显著($P<0.05$)

Note: Different capital letters in the same column indicate significant differences between different reclamation modes for the same element ($P<0.05$), and different lowercase letters in the same row indicate significant differences in soil depths for the same element ($P<0.05$)

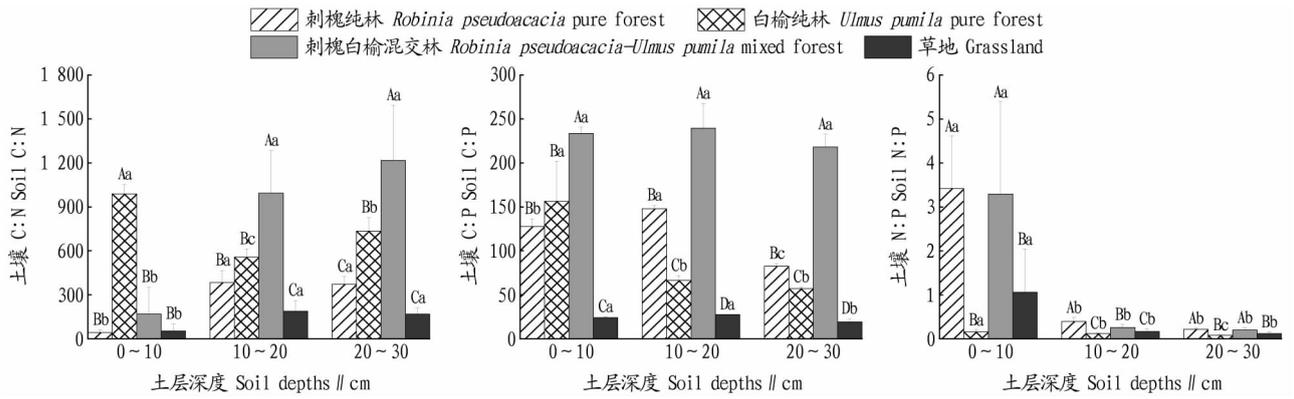
2.2 不同复垦模式土壤 C、N、P 化学计量比 从图 1 可以看出,不同复垦模式土壤 C:N 和 C:P 随土层深度的变化并未呈现一致的规律。在刺槐纯林、白榆纯林、刺槐白榆混交林和草地复垦模式下,0~30 cm 土壤 C:N 分别为 266.30、760.01、793.16 和 136.57,即刺槐白榆混交林>白榆纯林>刺槐纯林>草地。刺槐白榆混交林和草地土壤 C:N 在 10~20 和 20~30 cm 土层显著高于 0~10 cm($P<0.05$),且刺槐白榆混交林土壤 C:N 在 10~20 和 20~30 cm 土层显著高于其他复垦模式($P<0.05$)。

在刺槐纯林、白榆纯林、刺槐白榆混交林和草地复垦模

式下,0~30 cm 土壤 C:P 分别为 119.43、93.36、230.43 和 23.62,即刺槐白榆混交林>刺槐纯林>白榆纯林>草地。刺槐白榆混交林土壤 C:P 在土层中无显著差异($P>0.05$),刺槐纯林、刺槐白榆混交林和草地土壤 C:P 均在 10~20 cm 土层中最大,且刺槐白榆混交林在各土层中均显著高于其他复垦模式($P<0.05$)。

所有复垦模式土壤 N:P 都随土层深度加深而减少。在刺槐纯林、白榆纯林、刺槐白榆混交林和草地模式下,0~30 cm 土壤 N:P 为 1.35、0.12、1.25 和 0.45,即刺槐纯林>刺槐白榆混交林>草地>白榆纯林。各复垦模式土壤 N:P 均在 0~10 cm 土层

显著高于其他土层 ($P < 0.05$)。刺槐纯林和刺槐白榆混交林土壤 N:P 在所有土层均显著高于其他复垦模式 ($P < 0.05$)。



注:不同大写字母表示相同土层深度不同复垦模式间差异显著 ($P < 0.05$),不同小写字母表示相同复垦模式不同土层深度差异显著 ($P < 0.05$)

Note: Different capital letters indicate significant differences between different reclamation modes in the same soil layer depth ($P < 0.05$), and different lowercase letters indicate significant differences in soil layer depths in the same reclamation mode ($P < 0.05$)

图1 不同复垦模式土壤 C、N、P 化学计量比

Fig. 1 C, N, P stoichiometric ratios of soil under different reclamation modes

2.3 土壤 C、N、P 含量及其比值的相关性分析 相关分析结果表明(表 2),土壤 C 含量与土壤 P 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$),与土壤 C:N 呈显著负相关 ($P < 0.05$)。土壤 P 含

量与土壤 C:N 呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。土壤 C:N 与土壤 N:P 呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。土壤 C:P 与土壤 N:P 呈显著负相关 ($P < 0.05$)。

表 2 不同复垦模式土壤 C、N、P 含量及其比值的相关性

Table 2 Correlation of soil C, N, P contents and their ratios under different reclamation modes

指标 Index	土壤 C Soil C	土壤 N Soil N	土壤 P Soil P	土壤 C:N Soil C:N	土壤 C:P Soil C:P	土壤 N:P Soil N:P
土壤 C Soil C	1	-0.281	0.696**	-0.410*	0.139	0.003
土壤 N Soil N		1	-0.305	-0.062	-0.014	0.188
土壤 P Soil P			1	-0.600**	0.197	0.116
土壤 C:N Soil C:N				1	-0.211	-0.414**
土壤 C:P Soil C:P					1	-0.237*
土壤 N:P Soil N:P						1

注: * 表示显著相关 ($P < 0.05$), ** 表示极显著相关 ($P < 0.01$)

Note: * indicates significant correlation ($P < 0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P < 0.01$)

3 结论与讨论

3.1 不同复垦模式土壤 C、N、P 含量变化特征 土壤养分是植物生长的关键因素,它的供应与植物的光合作用、代谢等过程有着紧密的相关性,同时植物也能有效提高土壤的 C、N、P 含量,且不同的复垦模式会影响土壤养分。C 是土壤肥力的重要象征,是影响土壤和大气碳平衡的重要标志,在林业可持续发展中发挥着举足轻重的作用^[5]。N、P 是土壤的重要组成部分,是影响土壤肥力和植物营养状况的主要因子,是反映土壤质量的重要指标^[6]。

该研究中,刺槐纯林、白榆纯林、刺槐白榆混交林和草地的土壤 C 含量 (67.89 g/kg) 高于全国平均水平 (11.12 g/kg), N、P 含量 (0.43、0.51 g/kg) 均低于全国平均水平 (1.06、0.65 g/kg)^[7]。根据全国第二次土壤普查养分分级标准^[8],土壤 C 含量为一级,土壤 N 含量为六级,土壤 P 含量为四级,可知阜新海州露天矿排土场土壤 C 含量丰富,土壤 N 含量极为缺乏,土壤 P 含量较为缺乏。

该研究 4 种不同复垦模式土壤 C 含量和 N 含量集中在 0~20 cm 土层,在 20~30 cm 土层均低于 0~10 和 10~20 cm

土层,这是由于枯枝落叶分解产生的 C 和 N 在表层积累,通过水等介质向下迁移,随土层加深而减少。0~10 和 10~20 cm 土层土壤 C 含量和 N 含量差距较少,可能是测定时正处于植物的生长发育期,根系从下向上吸收养分的缘故。由于草地凋落物量明显小于乔木,草地土壤 C 含量和 N 含量明显小于其他乔木复垦模式。土壤 P 含量在 3 个土层之间没有显著差别 ($P > 0.05$),P 含量基本是稳定状态,呈“圆柱体”分布,与湘潭锰矿栎树土壤 P 含量呈现一致规律^[9]。

该研究刺槐白榆混交林土壤 C、N、P 平均含量 (147.65、0.78、0.64 g/kg) 均高于刺槐纯林 (64.87、0.73、0.54 g/kg)、白榆纯林 (53.39、0.07、0.62 g/kg),表明混交林地比纯林具有更积极的养分累积作用,证实了吕文强等^[10]研究的不同植物在土壤 C、N 元素的积累速率上存在差异的结果。

3.2 不同复垦模式土壤 C、N、P 化学计量比变化特征 土壤 C、N、P 化学计量特征是土壤肥力和养分循环变化的重要指标^[11-12]。阜新海州露天矿排土场 4 种不同复垦模式土壤 C:N、C:P (489.01、116.71) 显著高于全国水平 (12.01、25.77)^[13],土壤 N:P (0.79) 低于全国水平 (2.15)^[13]。土壤

C:N 高与土壤 N 含量极少有关,微生物需要从土壤中摄取 N 来满足生长需要^[14],有机质的分解速率较慢,何高迅等^[15]认为当土壤 C:N 越高,越有利于有机物的积累,4 种复垦模式土壤均在有机物积累阶段。土壤 C:P 的高低与全磷含量关系密切,是 P 有效性的重要指标。土壤 C:P 高不利于微生物分解有机质,且微生物会与植物争夺土壤 P,植物生长受到限制^[16]。土壤 N:P 可以用来判别 N 的饱和度,也可以预测不同土壤养分的限制类型。研究表明,N:P<10 时受 N 限制^[17],该研究发现 4 种复垦模式土壤养分受 N 限制。

3.3 土壤 C、N、P 含量及其比值的相关性分析 该研究结果表明,土壤 C 含量与土壤 C:N 呈显著负相关,土壤 P 含量与土壤 C 含量呈极显著正相关,与土壤 C:N 呈极显著负相关,说明土壤养分受到 N 的限制更大。因此,在海州露天矿排土场中要提高土壤氮的供给,以利于植被恢复。

参考文献

- [1] 王绍强,于贵瑞.生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J].生态学报,2008,28(8):3937-3947.
- [2] 张亚冰,吕文强,周传艳,等.贵州月亮山 5 个优势树种叶片与土壤生态化学计量特征[J].水土保持研究,2017,24(5):182-188.
- [3] 胡忠良,潘根兴,李恋卿,等.贵州喀斯特山区不同植被下土壤 C、N、P 含量和空间异质性[J].生态学报,2009,29(8):4187-4195.
- [4] 鲍士旦.土壤农业化学[M].北京:中国农业出版社,2000:22-100.
- [5] 龙攀,苏姗,黄亚男,等.双季稻田冬季种植模式对土壤有机碳和碳库

- 管理指数的影响[J].应用生态学报,2019,30(4):1135-1142.
- [6] 薛睿,柴春山,马驰,等.黄土丘陵沟壑区柠条人工林地土壤养分特征研究[J].中国水土保持,2019(7):49-51,73.
- [7] 马剑,刘贤德,金铭,等.祁连山 5 种典型灌丛土壤生态化学计量特征[J].西北植物学报,2021,41(8):1391-1400.
- [8] 全国土壤普查办公室.中国土壤普查技术[M].北京:农业出版社,1992.
- [9] 徐露燕,田大伦,王光军,等.湘潭锰矿采区叶片和土壤 N、P 化学计量特征[J].生态学报,2014,34(9):2316-2322.
- [10] 吕文强,唐金刚,罗时琴,等.4 种植被恢复模式对贵州石漠化地区表层土壤有机碳氮的影响研究[J].林业资源管理,2016(5):47-52,70.
- [11] 张光德,赵传燕,戎战磊,等.祁连山中部不同植被类型土壤生态化学计量特征研究[J].兰州大学学报(自然科学版),2019,55(4):533-540.
- [12] 李尧,雷泽勇,于东伟,等.樟子松人工林生长对土壤碳氮磷化学计量的影响[J].安徽农业科学,2021,49(2):91-94.
- [13] 董雪,辛智鸣,黄雅茹,等.乌兰布和沙漠典型灌木群落土壤化学计量特征[J].生态学报,2019,39(17):6247-6256.
- [14] BAI Y F, CHEN S Y, SHI S R, et al. Effects of different management approaches on the stoichiometric characteristics of soil C, N, and P in a mature Chinese fir plantation[J]. Science of the total environment, 2020, 723:1-8.
- [15] 何高迅,王越,彭淑娟,等.滇中退化山地不同植被恢复下土壤碳氮磷储量与生态化学计量特征[J].生态学报,2020,40(13):4425-4435.
- [16] 赵栋,王琪,连娥,等.白龙江干旱河谷不同植被土壤碳氮磷化学计量特征[J].中国土壤与肥料,2020(4):178-185.
- [17] BUI E N, HENDERSON B L C. N:P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors[J]. Plant and soil, 2013, 373(1/2):553-568.

(上接第 80 页)

参考文献

- [1] 韩会然,杨成凤,宋金平.北京市土地利用空间格局演化模拟及预测[J].地理科学进展,2015,34(8):976-986.
- [2] 席梅竹,赵中秋,吴攀升,等.基于改进 CA-Markov 模型的滹沱河流域山区段土地利用变化模拟及预测[J].西北林学院学报,2021,36(4):150-158.
- [3] 李广东.全球土地覆被时空变化与中国贡献[J].地理学报,2022,77(2):353-368.
- [4] 刘纪远,宁佳,匡文慧,等.2010—2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J].地理学报,2018,73(5):789-802.
- [5] 王小伦,刘雁,张玉,等.基于 CA-Markov 模型的吉林省西部土地利用/覆被变化研究及预测[J].科学技术与工程,2021,21(19):7942-7948.
- [6] 陈军,陈利军,李然,等.基于 GlobeLand30 的全球城乡建设用地空间分布与变化统计分析[J].测绘学报,2015,44(11):1181-1188.
- [7] 陈军.基于 GlobeLand30 的全球耕地利用格局变化研究[J].中国农业科学,2018,51(6):1089-1090.
- [8] 余德贵,吴群.基于 Logistic-Markov 方法的土地利用结构变化多因素驱动预测模型研究与应用[J].水土保持通报,2017,37(1):149-154,160.
- [9] 弗雷,朱京海,胡克梅,等.基于 CA 模型的城市空间扩展模拟预测:以锦葫沿海地区为例[J].国土资源遥感,2012,24(3):129-134.
- [10] 张乐勤,陈发奎.基于 Logistic 模型的中国城镇化演进对耕地影响前景预测及分析[J].农业工程学报,2014,30(4):1-11.
- [11] 凌成星,鞠洪波,张怀清,等.基于 CA-MARKOV 模型的北京湿地资源变化预测研究[J].中国农学通报,2012,28(20):262-269.
- [12] 崔敬涛.基于 Logistic-CA-Markov 模型的临沂市土地利用变化模拟预测研究[D].南京:南京大学,2014.
- [13] 陈鼎晓,张永福.基于 CA-Markov 模型的县域土地利用时空演变分析及预测研究[J].安徽农业科学,2020,48(18):65-69.

- [14] 王俊智.基于 GWR 模型的耕地利用时空演变及驱动力分析:以新疆阿克苏地区为例[D].乌鲁木齐:新疆大学,2016.
- [15] 梁田田,张永福,夏楠,等.近 26 年和田绿洲人口对 LULC 时空变化分析及其生态响应[J].江苏农业科学,2020,48(16):302-308.
- [16] 孙智斌,高敏华,崔雪锋.基于遥感与 GIS 的天山北坡经济带 2000—2015 年土地利用动态变化研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2018,54(3):397-404.
- [17] 郭佳君,李茜.耕地资源禀赋与农业产业空间布局优化:以山西省榆社县为例[J].湖北农业科学,2021,60(16):70-75.
- [18] 伊木然江·阿卜来提,张永福,孜比布拉·司马义.基于 GlobeLand 30 的哈密市 2000—2020 年土地利用格局变化研究[J].水土保持通报,2021,41(1):182-189,196.
- [19] 何泽雁,林惠花,武国胜.长汀县土地利用动态变化及生态安全评价[J].福建师范大学学报(自然科学版),2021,37(6):81-92.
- [20] 韩文文.基于 CA-Markov 的农林交错区土地利用变化分析及预测[D].哈尔滨:东北农业大学,2018.
- [21] 朱磊,夏鑫鑫,杨爱民,等.玛纳斯河流域绿洲区耕地扩张的 CA-Markov 模型参数敏感性分析[J].干旱区研究,2020,37(5):1327-1336.
- [22] 刘培,贾守军,马朝阳,等.基于 GlobeLand 30 数据和 CA-Markov 模型的郑州市 2000—2020 年地表覆盖变化特征及预测分析[J].水土保持通报,2017,37(4):282-287.
- [23] 霍明明,张轶莹,陈伟强.基于 CA-Markov 的土地利用变化及预测研究:以巩义市鲁庄镇为例[J].中国农学通报,2015,31(12):279-284.
- [24] 何丹,周璟,高伟,等.基于 CA-Markov 模型的滇池流域土地利用变化动态模拟研究[J].北京大学学报(自然科学版),2014,50(6):1095-1105.
- [25] 孙晓莉,张顺安,刘应芳,等.基于 GIS 的土地利用动态变化及其驱动力分析[J].地理空间信息,2021,19(11):101-103,111.
- [26] 张杰,周寅康,李仁强,等.土地利用/覆盖变化空间直观模拟精度检验与不确定性分析:以北京都市区为例[J].中国科学(D 辑:地球科学),2009,39(11):1560-1569.