

对喀斯特地区不同利用方式下土壤质量的评价

李 婷, 董艺博, 谭玉兰, 周 丽, 陈 超*

(贵州大学动物科学学院, 贵阳 550025)

摘 要:为更好地了解喀斯特地区脆弱土地生态系统的演变规律和土地资源的合理化利用,选取贵州省惠水县农田、天然草地、弃耕地、林地和人工草地五种不同土地利用方式,研究其土壤的理化性质及重金属含量并进行综合评价。结果表明:该研究区土壤为酸性土壤,其理化性质总体满足作物生长需求。不同土地利用方式对土壤容重、土壤孔隙度和pH的影响较小;土壤中氮、磷、钾单项含量表现不一。对不同土地利用方式下土壤养分进行评价后得出结论为农田最高为正值,其余均为负值;研究区土壤中Cd含量较高,符合贵州省土壤重金属背景值;结合土壤养分和重金属含量对惠水不同土地利用方式下的土壤进行了综合评价,得出林地的SQI值最高,天然草地最低,说明正、负效应指标都能影响土壤质量。本研究结果表明,该地区的土壤质量较好,污染较轻。该研究为提高喀斯特石漠化土地生产性能提供了科学依据。

关键词:土壤;土地利用方式;理化性质;重金属含量;综合评价

中图分类号:S158.3

文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2022)06-0059-06

Evaluation of Soil Quality in Different Utilization Ways in Karst Areas

LI Ping, DONG Yibo, TAN Yulan, ZHOU Li, CHEN Chao*

(College of Animal Science, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to better understand the evolution law of fragile land ecosystem in karst areas and the rational use of land resources, five different land use modes, namely farmland, natural grassland, abandoned farmland, forest land and artificial grassland, were selected in Huishui County, Guizhou Province, to study the physical and chemical properties and heavy metal content of the soil and conduct a comprehensive evaluation. The results showed that the soil in the study area was acidic, and its physical and chemical properties generally met the needs of crop growth. The effects of different land use methods on soil bulk density, soil porosity, and pH are small. The individual contents of nitrogen, phosphorus, and potassium in the soil vary. After evaluating the soil nutrients under different land use methods, it was concluded that the highest value of the farmland was positive, and the rest were negative values. The heavy metal content in the soil indicated that the Cd content in the study area was higher, which was in line with the Guizhou Province soil heavy metal background value. After comprehensively evaluating soil nutrients and heavy metal content, the soil under different land use methods in Huishui was comprehensively evaluated. It was concluded that the forest land had the highest SQI value and the lowest natural grassland, indicating that both positive and negative effect indicators could affect soil quality. Based on the conclusions of this study, the soil quality in this area is better and the pollution is lighter. The research provided a scientific basis for improving the productivity of karst rocky desertification land.

Key words: Soil; Ways of land use; Physical and chemical properties; Heavy metal content; Comprehensive evaluation

土壤作为陆地生态系统中的重要成分之一,

不仅是陆地植物的基础营养库,还能使绿色植物的根系在土壤中伸展和穿插。喀斯特石漠化是地表出现类似荒漠景观的土地退化过程^[1],成为制约我国西南喀斯特地区区域经济社会发展的重大生态问题^[2],同时地表植被的变化影响着凋落物量和地表侵蚀的过程^[3]。其中,贵州省惠水县作为珠江支流红水河流域的源头,境内的石漠

收稿日期:2020-01-12

基金项目:国家自然科学基金项目(31560670);贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2018]2258)

作者简介:李 婷(1996-),女,硕士,主要从事草地生态研究。

通讯作者:陈 超,男,博士,教授,E-mail: gzgyxgc3852218@163.com

化现象十分严重。因此,改变不合理的土地利用方式已经成为提高土壤质量,促使已经退化的生态系统达到生态平衡和良性循环的重要生态措施^[4]。马志敏等^[5]对黑河荒漠绿洲区不同土地利用方式下的土壤肥力状况的研究表明,人为长期耕作及农田的不断扩张是土壤肥力退化的主要原因。李亚娟等^[6]以青藏高原青海省海北州不同土地利用方式为研究对象探索其对土壤理化性状的影响,得出结论为草地开垦和农作均会导致土壤表层速效氮的损失。郑琦等^[7]在对新疆不同利用方式下的土壤质量进行综合评价后得出其理化性质和重金属都是影响土壤质量的重要因素。综上,对不同土地利用方式下土壤质量的合理评价能促进土壤与植被相互作用、相互影响。但是在前人的研究中,鲜有在贵州进行综合正、负效应的土壤评价。本研究以贵州省惠水县的土壤为研究对象,通过对土地利用方式变化下土壤的理化性质以及土壤中重金属含量进行分析和综合评价,为认识在喀斯特生态系统背景下不同土地利用地区的土壤-植物的养分循环系统和机制提供科学依据,为贵州乃至中国西南喀斯特森林保护和石漠化生态系统恢复重建提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贵州省惠水县位于贵阳市正南面,属于喀斯特盆地地貌。地势呈北高南低,地理位置为东经 106°22′~107°06′,北纬 25°41′~26°18′,全县海拔 1 100 m 左右,属亚热带季风气候,年降水量 1 154 mm,年平均气温 16.3 °C,≥10°C 积温为 4 797.5 °C·d,全年日照时数 1 000~1 325 h,无霜期 278 d。县境属亚热带黔中高原黄壤带区,地质地貌和气候条件较为复杂,土壤类型较多。

1.2 试验方法

在惠水县不同利用方式下典型区域内进行土壤的取样,每种土地随机设置 3 个样地,样地之间的间隔≥20 m,面积约为 2 hm²,在每个样地设置取样点 3 个以上,在每块样地内随机选取 10 个样点,按照 0~10 cm、10~30 cm 和 30~50 cm 分层土钻取得土样,然后将同一层的样品进行混合,利用四分法获取所测混合样(≥1 kg),自然风干后筛选过筛(2 mm),挑出植物根茎和石砾,放于密封袋内以便于室内分析使用。

1.3 测定项目

1.3.1 指标测定

测定土壤理化指标包括容重、孔隙度、pH、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、有效钾,测定方法参照《土壤农业化学常规分析方法》。重金属指标包括 Cd、Cr、Pb、Ni、Hg、As,采用石墨炉原子吸收分光光度法测定 Cd、Hg、As、Pb 含量;火焰原子吸收分光光度法测定 Cr、Ni 含量。

1.3.2 主成分分析法

不同利用类型的土壤质量综合评价值为:

$$P_i = \sum_{j=1}^n X_{ij} w_j \dots\dots\dots (1)$$

式中, P_i 为不同利用类型*i*下的土壤质量综合评价值; X_{ij} 为不同利用类型*i*下第*j*个指标的标准化值; w_j 为第*j*个指标的权重值,由主成分分析法得出。

1.3.3 土壤重金属污染评价法

采用单因子污染指数(PI)和内梅罗综合污染指数(PN)分别进行计算评价,计算公式为:

$$PI = C_i / C_1 \dots\dots\dots (2)$$

$$PN = \sqrt{\left[\frac{PI_{Ave}^2 + PI_{Max}^2}{2} \right]} \dots\dots\dots (3)$$

式中,PI为单项污染指数; C_i 为土壤*i*元素的实测值, C_1 取国家土壤质量标准中的二级标准值;PN为内梅罗污染指数, PI_{Ave} 为单项污染指数的均值; PI_{Max} 为单项污染指数的最大值。

1.3.4 土壤综合指数评价法

综合土壤的理化性质指标和重金属指标,采用SQI土壤质量综合评价法^[7]对研究区不同土地利用下的土壤质量进行综合评价,计算公式为:

$$SQI = \begin{cases} 0 & PI_{Ave} > 1 \\ \sqrt{(SFI_{Min}^2 + SFI_{Ave}^2) / (PI_{Max}^2 + PI_{Ave}^2)} & 0.3 < PI_{Ave} \leq 1 \\ \sqrt{SFI_{Min}^2 + SFI_{Ave}^2} & PI_{Ave} \leq 0.3 \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

式中,SQI为土壤质量指数,SFI为土壤养分指数, $SFI = S_i / S_1$, S_i 为土壤养分的实测值, S_1 为贵州省养分指数的分级标准, SFI_{Min} 为SFI的最小值, SFI_{Ave} 为SFI的均值。

1.4 数据分析

所有试验数据采用Excel 2003进行整理计算,用SPSS 19.0数据分析软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 惠水土壤理化性质描述统计

由表1可知,研究区土壤容重及孔隙度的含

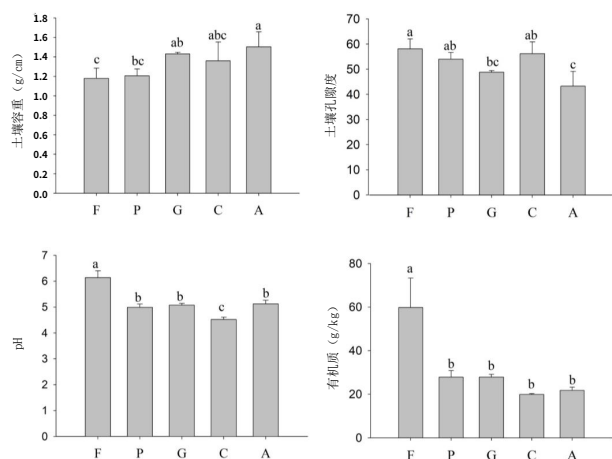
表 1 惠水表层土壤理化性质描述统计

元素	描述性统计分析结果					
	范围(g/kg)	均值(g/kg)	标准差(g/kg)	变异系数(%)	峰度	偏度
土壤容重	1.06~1.63	1.34	0.17	13	-0.95	0.05
土壤孔隙度	38.49~62.64	52.07	6.51	13	0.38	-0.47
酸碱度	4.42~6.44	5.17	0.56	11	0.7	1.04
有机质	19.56~74.25	31.46	15.95	51	2.99	1.88
全氮	1.15~3.99	2.09	0.69	33	3.12	1.29
全磷	0.3~0.76	0.46	0.16	35	0.4	1.33
全钾	3.95~7.22	5.66	0.97	17	-0.51	0.03
碱解氮	36.08~123.39	91.29	27.8	30	-0.83	-0.6
有效磷	2.1~15.8	6.73	5.26	78	-0.75	1.07
速效钾	30.96~65.62	48.43	9.97	21	-0.97	0.15

量范围(均值)为1.06~1.63(1.34)g/kg、38.49~62.64(52.07)g/kg,表明土壤硬度较大,过于紧实。而土壤pH范围在4.42~6.44,均值为5.17,表明研究区土壤为酸性土壤,符合贵州地区土壤特性。该地区土壤质量达到中级标准(全国第二次土壤普查分级标准),满足地区作物生长基本需要;就变异系数来看,土壤物理性质变异系数为13%、13%、11%,属于低度变异,有机质和有效磷的变异系数为51%及78%,属于高度变异(CV>36%),表明不同土地利用方式的有机质和有效磷含量差异较大。

2.2 惠水不同土地利用方式下土壤容重、孔隙度、pH及有机质的分布

土壤容重、孔隙度作为土壤紧实度的敏感性指标,是土壤质量的重要参数^[8]。如图1所示,在不同土地利用方式下,弃耕地的土壤孔隙度较低,且与林地、人工草地及农田的差异显著。林地土壤的



注:F=林地,P=人工草地,G=天然草地,C=农田,A=弃耕地;小写字母不同表示不同土地利用方式之间存在显著差异($P<0.05$),下同

图1 研究区不同土地利用方式下的土壤容重、孔隙度、pH及有机质的分布

pH最高,天然草地土壤与弃耕地和天然草地的pH差异不显著,但与其他利用方式差异均显著。

土壤有机质能直接影响和改变土壤的一系列物理、化学和生物学性质^[9]。在不同土地利用方式下的林地土壤有机质含量显著高于其他土地利用方式。

2.3 惠水地区不同土地利用方式下土壤全氮、全磷及全钾的分布

如图2所示,弃耕地、天然草地的土壤全氮含量较低,人工草地土壤全氮含量较高。农田的土壤全磷含量最高,且与其他4种土地利用方式下的土壤全磷含量差异显著,天然草地的土壤全磷含量同样显著最低。

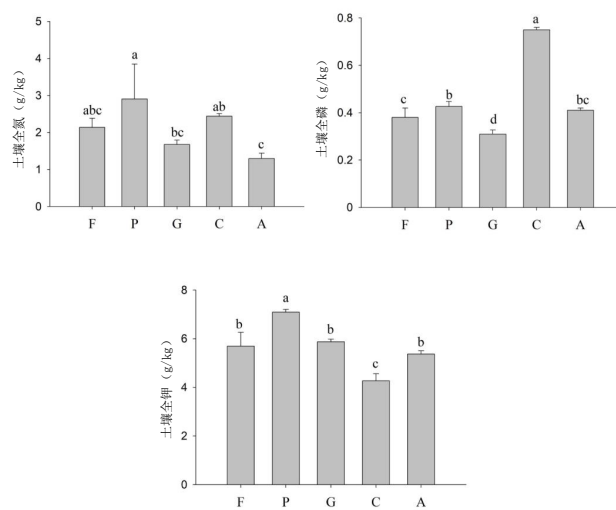


图2 研究区不同土地利用方式下的土壤全氮、全磷及全钾的分布

2.4 惠水不同土地利用方式下土壤碱解氮、有效磷及速效钾的分布

碱解氮能较好地反映出近期土壤氮的供应状况和氮的释放速率^[10]。如图3所示,人工草地的

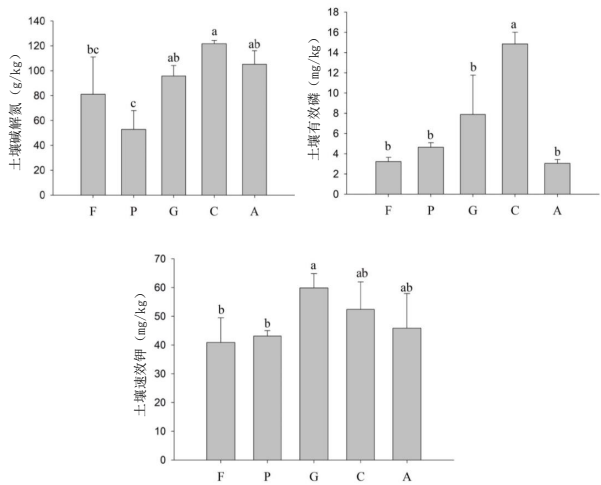


图3 研究区不同土地利用方式下的土壤碱解氮、有效磷及速效钾的分布

土壤碱解氮含量较低,但与林地土壤中碱解氮含量差异不显著。5种土地利用方式中农田土壤有效磷含量较高,但是较天然草地来看,林地和弃耕地与其他土地相比含量最少。相较于其他四种土地利用方式,天然草地的土壤速效钾含量最高,且与林地和人工草地的差异显著。

2.5 土壤养分综合评价

根据特征值 $\gamma>1$ 的原则提取所测指标的前三个主成分,它们的值分别为4.012、2.550和1.413。在本研究中,前3个主成分能够基本涵盖所有信息,所以可以默认为前三个主成分可以代表所有的信息。根据主成分得分矩阵可以建立主成分得分方程:

$$Y_1=0.35X_1-0.2X_2-0.39X_3-0.36X_4-0.11X_5+0.31X_6-0.35X_7+0.37X_8+0.34X_9+0.27X_{10}$$

$$Y_2=-0.39X_1+0.54X_2-0.12X_3+0.09X_4+0.45X_5+0.44X_6-0.10X_7+0.04X_8+0.34X_9-0.08X_{10}$$

$$Y_3=-0.53X_1+0.72X_2-0.17X_3+0.11X_4+0.61X_5+0.60X_6-0.14X_7+0.06X_8+0.45X_9-0.11X_{10}$$

将标准化后的变量带入函数方程计算,得到5种不同土地利用方式的土壤的Y,用因子的方差贡献率作为综合评价的权重,按照各自的方差贡献率加权相加得出不同土地利用方式下的土壤质量综合得分,计算公式如下:

$$Y=0.401Y_1+0.255Y_2+0.141Y_3$$

由表2可以看出,5种不同土地利用方式中,只有农田的土壤质量综合得分最高,且为正值,说明农田的土壤质量高于平均水平。所有土地利用方式的得分分别为2.01、-0.29、-0.37、-0.52、-0.83。除农田外,其余4种土地利用方式的土壤质量都低于平均水平。

表2 主成分因子得分与综合得分

土地利用方式	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y	排名
农田	2.69	2.08	2.83	2.01	1
天然草地	0.59	-3.58	-1.62	-0.29	2
人工草地	-1.62	0.63	0.85	-0.37	3
弃耕地	0.89	-1.97	-2.64	-0.52	4
林地	-2.56	0.45	0.58	-0.83	5

2.6 惠水不同土地利用方式下土壤重金属污染评价

参照土壤质量标准对研究区不同利用方式下的土地类型进行了重金属污染的评价。从图4可以看出,内梅罗污染指数最高的不超过0.4,说明该地区的污染指数较低,土壤质量较好。从重金属单项污染值来看,研究区内土壤除人工草地和农田外的Cd含量较高,As含量较低。采用内梅罗污染指数法可以更好地反映出5种土地利用方式下的总体污染情况。

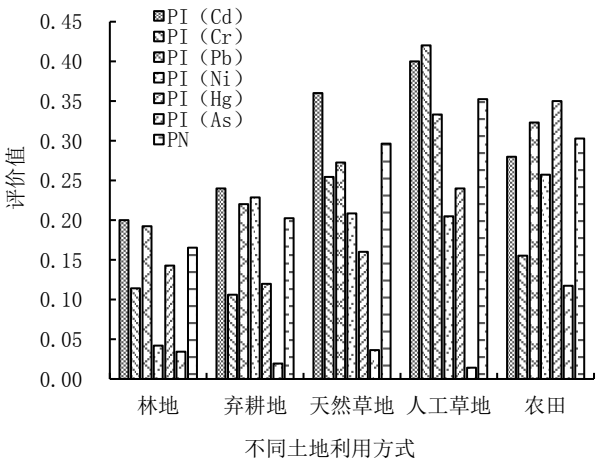


图4 单因子和内梅罗污染指数(PN)

2.7 惠水不同土地利用方式下土壤质量综合评价

在土壤肥力和重金属因子的共同作用下,用SQI公式对土壤质量进行了综合研究,结果见表3。得出结论为林地的SQI值最高为1.88;其次为农田,SQI值为0.88;弃耕地SQI值为0.77与人工草地SQI值相等;天然草地SQI值最低为0.73。在该值的映射下,研究区内的土壤质量良好。

表3 不同土地利用方式下的土壤综合SQI值及其排名

土地利用方式	SQI	排名
林地	1.88	1
农田	0.88	2
弃耕地	0.77	3
人工草地	0.77	3
天然草地	0.73	5

3 讨 论

3.1 土地利用方式对土壤理化性质的影响

土壤的理化性质决定着该地区土地利用的可持续发展。在本研究中,由于人为耕种和土壤表层的凋落物增多导致土壤容重降低,所以弃耕地的土壤容重最大,林地最小。这与李亚娟等^[11]的研究结果一致。而土壤的退化会导致地表的严重剥蚀,随之土壤的紧实度也会下降。弃耕地、天然草地和林地受人为干扰较小,地表植被覆盖度相对来说较大,可以保护土壤免受侵蚀影响,故pH较低;从不同土地利用方式的土壤孔隙度的表现能反映出植物生活土层的通透性变化^[12]。

土壤中的有机质绝大部分直接来源于土壤上生长的植物残体和根系分泌物,其次是动物排泄物及残体。在本次研究的5种土地利用方式中,林地的土壤有机质是处于累积过程的,而在其他土地利用方式下随着地上部分生物量的增加和人为施肥及管护等影响,土壤的通气性增加,有机质逐渐分解衰减。这与常风来等^[13]的研究结果一致。

农田土壤微生物对外界环境的作用非常敏感^[14],所以对农田土壤的翻耕和开垦以及人为活动可导致压实犁盘的形成,可能是导致其土壤中碱解氮、有效磷和速效钾含量明显增加的原因^[15]。而缺少钾可能是由于土壤pH较低呈酸性,导致黏土矿物中的钾不断释放,最后成了可溶形态,加剧了淋溶损失,导致土壤钾库的贫化^[16]。

3.2 不同土地利用方式下土壤养分综合指数

进行土壤质量评价可以正确认识土壤,从而有效管理和保护土壤^[17]。除农田外,其余4种利用方式得分均为负值,这可能是因为该地区的农田经过合理的施肥和管理,提高了土壤的肥力,避免了土壤的退化,且在一定程度上具有土壤培肥的能力,所以得分最高,说明改善农田的水肥管理有利于改善酸性土壤的土地质量^[18],这与张静等^[19]的研究结果一致。

3.3 试验区重金属污染评价

重金属可通过食物链传递,是一类在环境中降解缓慢,对新陈代谢和生理功能具有明显抑制作用的环境污染物^[20]。由于碳酸盐岩基岩中富含Cd,而风化作用会导致土壤中的Cd逐渐富集^[21],导致本研究中研究区土壤内Cd含量较高,符合贵州省背景值。

研究表明,燕麦等谷类作物的根系分泌物的酸性物质会使重金属的生物有效成分增加,农药

和农膜等措施也会引起土壤中重金属的富集^[22]。特别是在酸性土壤中,土壤重金属的有效性会显著增强,地上植物对重金属的吸收也会使土壤内重金属含量增加^[23]。所以即使农田和天然草地的养分综合指数较高,但是其内梅罗污染综合指数(PN)值受成土母质和施肥的影响同样最高。天然草地则是由于地上部分植物累积进入土壤后不断积累,且很难彻底消除^[24],而植物释放出的根系分泌物也能为林地富集大量重金属^[25]。但总体上看,该区域的重金属单因子评价最高不超过0.4,最低接近0,说明该地区的污染指数较低,土壤质量较好。

3.4 研究区不同土地利用方式土壤质量综合评价

地区土壤肥力的高低会受到土壤理化性质、养分含量及环境条件的影响^[26]。本研究中土壤质量的综合评价是由土壤理化性质和土壤重金属含量共同决定的。结合重金属含量后的土地质量排名发生变化。其中林地因其重金属含量较低,所以在SQI排名中得分最高,农田则因重金属含量影响,排名次之。说明在土地评价中,正面效应和负面效应都能对最后评价的结果产生影响^[24]。

该方法可有效结合土壤肥力和重金属的污染状况,在评价土壤质量方面能够更全面、更客观。目前关于贵州喀斯特背景下的土壤质量评价大多选取的都是土壤的理化性质,评价指标的选取上具有局限性,未考虑到土壤的负效应带来的影响,在未来的研究中应该更加注重土壤指标的选取和正、负效应的代表性,以提高对土壤质量评价的普遍性和适用性。

4 结 论

该研究区的整体土壤结果表明土壤中养分元素含量可以满足该地区作物生长基本需要,其中对不同土地利用方式下土壤质量进行了综合评价后得出结论为农田最高为正值,其余均为负值,林地最差。但是结合土壤的重金属含量后再次评价,得出结论为林地的SQI值最高,天然草地最低,说明正面效应和负面效应都能对最后评价的结果产生影响。研究不同土地利用方式的土壤状况和重金属含量可以了解该区域的养分特征和污染情况,对合理开发利用土地,提高土地生产性能提供科学依据。

参考文献:

- [1] 王世杰.喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨[J].

- 中国岩溶, 2002(2): 31-35.
- [2] 熊康宁, 池永宽. 中国南方喀斯特生态系统面临的问题及对策[J]. 生态经济, 2015, 31(1): 23-30.
- [3] W M Post, K C Kwon. Soil Carbon Sequestration and Land-Use Change: Processes and Potential[J]. Global Change Biology, 2010, 6(3): 317-327.
- [4] 董莉丽, 郑粉莉. 黄土丘陵沟壑区土地利用和植被类型对土壤质量的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2010(2): 39-44.
- [5] 马志敏, 吕一河, 孙飞翔, 等. 黑河中游荒漠绿洲区土地利用的土壤养分效应[J]. 生态学报, 2013, 33(19): 6328-6334.
- [6] 李亚娟, 王亚亚, 曹广民, 等. 三江源区土地利用方式对土壤氮素特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(3): 272-277.
- [7] 郑琦, 王海江, 吕新, 等. 新疆棉田土壤质量综合评价方法[J]. 应用生态学报, 2018, 29(4): 1291-1301.
- [8] 郑郁善, 陈礼光, 洪伟. 毛竹杉木混交林生产力和土壤性状研究[J]. 林业科学, 1998, 34(S1): 16-25.
- [9] 刘鸿雁, 黄建国. 缙云山. 森林群落次生演替中土壤理化性质的动态变化[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2041-2046.
- [10] 林德喜, 樊后保, 苏兵强, 等. 马尾松林下套种阔叶树土壤理化性质的研究[J]. 土壤学报, 2004(4): 655-659.
- [11] 李亚娟, 曹广民, 龙瑞军, 等. 三江源区土地利用方式对草地植物生物量及土壤特性的影响[J]. 草地学报, 2016, 24(3): 524-529.
- [12] 魏卫东, 李希来. 三江源区不同退化程度高寒草地土壤特征分析[J]. 湖北农业科学, 2012(6): 1102-1106.
- [13] 常凤来, 田昆, 莫剑锋. 不同利用方式对纳帕海高原湿地土壤质量的影响[J]. 湿地科学, 2005, 3(2): 132-135.
- [14] 宋宇, 王鹏, 韦月平. 不同耕作模式的稻田土壤细菌群落结构分析[J]. 东北农业科学, 2019, 44(4): 46-49.
- [15] Murty D, Kirschbaum M U F, Mcmurtrie R E, et al. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature[J]. Global Change Biology, 2002, 8(2): 105-123.
- [16] 吴志丹, 江福英, 尤志明, 等. 福建省安溪县铁观音茶园土壤钾素状况[J]. 茶叶学报, 2018, 59(1): 26-32.
- [17] 董莉丽, 郑粉莉. 黄土丘陵沟壑区土地利用和植被类型对土壤质量的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2010(2): 39-44.
- [18] 王托和, 李宏斌. 1980-2004年张掖市耕地土壤养分变化及改良措施[J]. 甘肃农业科技, 2007(11): 38-41.
- [19] 张静, 刘任涛, 常海涛, 等. 宁夏农牧交错带土地利用变化对土壤质量的影响[J]. 生态科学, 2019, 38(2): 94-104.
- [20] 魏春雁, 刘笑笑, 宋志峰, 等. 不同产地中药材及其栽培土壤中重金属含量比较研究[J]. 东北农业科学, 2017, 42(4): 39-43.
- [21] Rambeau C M C, Denis Baize, Nicolas Saby, et al. High cadmium concentrations in Jurassic limestone as the cause for elevated cadmium levels in deriving soils: a case study in Lower Burgundy, France[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 61(8): 1573-1585.
- [22] 王腾飞, 谭长银, 曹雪莹, 等. 长期施肥对土壤重金属积累和有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(2): 257-263.
- [23] 赵斌, 朱四喜, 李相兴, 等. 贵州草海不同土地利用方式表层土壤重金属污染现状评估[J]. 环境化学, 2018, 37(10): 129-139.
- [24] 张汪寿, 李晓秀, 黄文江, 等. 不同土地利用条件下土壤质量综合评价方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 311-318.
- [25] 邓玲玲, 王婷婷, 郭实荣. 植物对土壤重金属的解毒机理[J]. 内蒙古林业调查设计, 2018(4): 97-99.
- [26] 翁悦, 吕竺妍, 李腾, 等. 长春市城区公园土壤的肥力特征分析与评价[J]. 东北农业科学, 2018, 43(1): 28-33.

(责任编辑: 刘洪霞)

- (上接第47页) resistance to the herbicide glyphosate [J]. The Plant Journal, 2014, 78(6): 916-926.
- [24] Xui F, He S, Zhang J, et al. Photoactivated CRY1 and phyB Interact Directly with AUX/IAA Proteins to Inhibit Auxin Signaling in Arabidopsis[J]. Molecular Plant, 2018, 11(4): 523-541.
- [25] Lim J, Park J H, Jung S, et al. Antagonistic Roles of PhyA and PhyB in Far-Red Light-Dependent Leaf Senescence in *Arabidopsis thaliana*[J]. Plant Cell Physiology, 2018, 59(9): 1753-1764.
- [26] Wu J, Wang W, Xu P, et al. phyB Interacts with BES1 to Regulate Brassinosteroid Signaling in Arabidopsis[J]. Plant Cell Physiology, 2019, 60(2): 353-366.
- [27] Sun W, Xu X H, Lu X, et al. The Rice Phytochrome Genes, PHYA and PHYB, Have Synergistic Effects on Anther Development and Pollen Viability[J]. Scientific reports, 2017, 7(1): 6439.

- [28] Li F, Fan G, Lu C, et al. Genome sequence of cultivated Upland cotton (*Gossypium hirsutum* TM-1) provides insights into genome evolution [J]. Nature Biotechnology, 2015, 33(5): 524-530.
- [29] Zhang T, Hu Y, Jiang W, et al. Sequencing of allotetraploid cotton (*Gossypium hirsutum* L. acc. TM-1) provides a resource for fiber improvement[J]. Nature Biotechnology, 2015, 33(5): 531-537.
- [30] 郑玲, 谢爱玲, 韩建明. 高粱MADS-box家族基因的鉴定与分析[J]. 东北农业科学, 2019, 44(5): 26-29.
- [31] Chalhoub B, Denoeud F, Liu S, et al. Early allopolyploid evolution in the post-Neolithic *Brassica napus* oilseed genome [J]. Science, 2014, 345: 950-953.
- [32] 岳晶, 管利萍, 孟思远, 等. 光敏色素信号通路中磷酸化修饰研究进展[J]. 植物学报, 2015, 50(2): 241-254.

(责任编辑: 刘洪霞)