

DOI: 10.11766/trxb201906140170

孟红旗, 郭晓明, 杨英, 王明仕. 采煤沉陷坡面土壤氮磷钾养分有效性的空间变异性[J]. 土壤学报, 2020, 57(4): 844–854.

MENG Hongqi, GUO Xiaoming, YANG Ying, WANG Mingshi. Spatial Variability of Soil Nitrogen, Phosphorus and Potassium Availability in Coal Mining Subsidence Slopes[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(4): 844–854.

采煤沉陷坡面土壤氮磷钾养分有效性的空间变异性*

孟红旗, 郭晓明, 杨英, 王明仕

(河南理工大学资源环境学院, 河南焦作 454010)

摘要: 探索采煤沉陷坡面上土壤氮、磷和钾养分迁移转化的作用机理, 对促进矿区生态环境综合整治的科学决策有重要理论和实践价值。以焦作九里山矿典型低潜水位采煤沉陷坑内的耕地和林地作为研究对象, 对比分析了土壤氮、磷和钾含量及有效态养分含量在不同土地利用类型(耕地和林地)、沉陷坡位(中心、坡底、坡中、坡顶和对照)和剖面深度(0~10、10~20、20~30、30~40、40~50 cm)的空间变异性。结果表明, 沉陷坡面土壤养分含量空间变异性从大到小依次为: 有效磷(118%)、有效氮(69%)、全氮(41%)、速效钾(27%)、全磷(19%)、全钾(4%)。相对于耕地, 林地全磷和有效磷含量显著($P < 0.001$)降低, 速效钾含量显著($P < 0.001$)升高。在沉陷坡面上, 耕地土壤氮和钾的有效性在坡底凹陷区最大, 而磷有效性在坡顶裂缝区最大; 林地土壤氮、磷和钾的有效性均在坡底凹陷区最大, 在中间坡面区最小。通过对土壤养分有效性在沉陷坡面上空间变异作用机理的分析, 提出了低潜水位沉陷区土壤可持续管理的具体区划模式, 以实现采煤沉陷区土地复垦改造的最小经济投入目标。

关键词: 采煤沉陷; 土地利用; 低潜水位; 养分有效性; 土壤可持续管理

中图分类号: S158.5; S281; X37 **文献标志码:** A

Spatial Variability of Soil Nitrogen, Phosphorus and Potassium Availability in Coal Mining Subsidence Slopes

MENG Hongqi, GUO Xiaoming, YANG Ying, WANG Mingshi

(School of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454010, China)

Abstract: 【Objective】 In the central and northeastern parts of China (excluding the eastern part of Inner Mongolia Autonomous Region), coal mining has caused extensive land subsidence, thus leading to land damage and soil degradation, which in turn seriously affects grain production, and intensifies conflicts between people and land. The aim of this study was to explore mechanisms for soil nutrients, for instance, nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K), migrating and transforming in coal mining subsidence slopes, and to provide certain scientific basis for comprehensive management of eco-environment in the mining areas. 【Method】 The cultivated land and forest land in a coal mining subsidence, low in phreatic water level and typical

* 国家自然科学基金项目(41502241)、河南省高等学校重点科研项目(16A210049)和河南省高校矿山环境保护与生态修复省级重点实验室培育基地开放课题(KF2014-05)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41502241), the Higher Education Key Research Project of Henan Province in China (No. 16A210049) and the Mines Environmental Protection and Ecological Rehabilitation Provincial Key Laboratory Breeding Base Open Topic of Henan Province in China (No. KF2014-05)

作者简介: 孟红旗(1979—), 男, 河南焦作人, 博士, 副教授, 主要从事土壤环境化学研究。E-mail: mengborse@sohu.com

收稿日期: 2019-06-14; 收到修改稿日期: 2019-07-31; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2019-09-16

of Jiulishan mining region in Jiaozuo City, Henan Province, China, were selected as object of the study. Soil samples were collected from soil layers (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm and 40-50 cm) of soil profiles distributed in different slope positions (center, bottom, middle, top and control) and lands different in land use for analysis of total contents and availabilities of N, P and K, and further for spatial variability of the indices. 【Result】 It was found that in terms of nutrient spatial variability on the slope, the three soil nutrients followed an order of available P (118%) > available N (69%) > total N (41%) > available K (27%) > total P (19%) > total K (4%). Compared with the cultivated land, the forest land lowered significantly ($P < 0.001$) in soil total P and available P, but ascended significantly ($P < 0.001$) in soil available K. Along the subsidence slope, availabilities of soil N and K in the cultivated land was the highest at the depressed in the bottom of the slope, while that of soil P in cracky areas at the top of the slope. However, in the forest land on the slope, availabilities of soil N, P and K were the highest in the depressed zone at the bottom of the slope, and the lowest in the middle slope zone. The high spatial variability of soil nutrient availability therein could be explained by the following; 1) loss of dissolved organic N and available K from cultivated soils with surface runoff; 2) cracks enhancing soil redox potential in the farmland, thus promoting release of soil P; 3) translocation of available K with vertical leaching in the depressed zone at the bottom of the slope. 【Conclusion】 Therefore, it is suggested that the land in such coal mining subsidence, low in phreatic water level, should be reclaimed in light of the rules of migration and transformation of soil nutrients and soil water relative to position along the subsidence slope. The cracky area on the top of the slope, the middle slope and the depressed at the bottom of the slope should be reclaimed into high-yield cultivated land or vegetable gardens, shrubbery and economic forest or orchard, respectively, so as to realize sustainable soil management and the goal of cost-minimizing input in land reclamation of coal mining subsidence.

Key words: Coal mining subsidence; Land use; Low phreatic water level; Nutrient availability; Sustainable soil management

中部和东北地区（不含蒙东）是我国重要的粮食生产基地，2017 年粮食产量和农作物播种面积分别为 3.4 亿 t 和 0.74 亿 hm^2 ，分别占全国的 51.3% 和 44.5%^[1]，与此同时，区域内煤炭产量和新形成沉陷土地面积分别为 14.2 亿 t 和 2.8 万 hm^2 ，分别占全国的 36.4% 和 42.7%^[2]。采煤沉陷引发了严重的土地损毁和土壤退化，进而影响矿区粮食生产，加剧人地矛盾^[3-5]，这一社会焦点问题在我国中部和东北地区尤为突出。至 2020 年，我国煤矿新增沉陷土地复垦率要求达到 60% 以上^[2]。通过适当的土地修整和土壤养分与水分的可持续管理，合理规划，因地制宜采用动态复垦工艺可期实现采煤沉陷区土地复垦改造的最小经济投入目标^[6-7]。

土壤氮、磷和钾养分含量是土壤肥力的重要组成部分，养分的形态和有效性决定了养分被植物根系获取的可能性，是土壤可持续管理的重要依据。与自然坡面不同，由于应力不均，采煤沉陷坡面土壤表现为非连续性，在坡顶受水平拉伸与垂直压缩张力的影响在表层产生垂直裂缝，在坡底受水平压缩与垂直拉伸张力的影响在亚表层产生空穴土洞^[8-9]，如图 1（左）所示。受新形成坡度和地表裂缝的共同影响，土壤养分随径流发生定向迁移和转化，随

着时间的推移，最终形成了沉陷区土壤肥力水平的高度异质性^[10]。淮北砂姜黑土耕地土壤中铵态氮和有效磷含量在塌陷形成初期较对照显著降低，养分流失量达到峰值；土地整理和耕作行为可部分掩盖氮磷流失现象，至塌陷中后期，土壤铵态氮和有效磷较对照无显著差异^[11]。潘三矿沉陷区土壤生物有效性氮含量占全氮的质量分数为 0.52%~5.32%，土壤养分含量（有机质、速效钾、全磷和全氮）分布表现出沿沉陷水域周边向外围逐渐递减的变化趋势^[12-13]。在沉陷坡面上，土壤全氮、硝态氮和铵态氮、全磷和有效磷均表现为由高到低依次为坡底凹陷区、坡顶裂缝区、中间坡面区^[14]。随着沉陷深度的增加，耕地土壤养分信息熵和土壤质量指数的变化趋势为先下降后上升，在坡底处反而较对照升高^[15-16]。沉陷区裂缝 30~60 cm 范围内耕地土壤有效氮和土壤呼吸显著降低，裂缝 60~90 cm 范围内小麦穗数和产量显著降低^[17]。在采煤沉陷的有裂缝区，耕地和林地的土壤有机碳储量分别较对照降低 65% 和 45%，耕地向林地转变表现为显著 ($P < 0.05$) 减缓土壤碳库损失；在无裂缝区，耕地和林地的土壤有机碳储量分别较对照降低 14% 和 23%，耕地向林地转变却表现为一定程度 ($0.01 < P < 0.10$) 加剧土壤碳

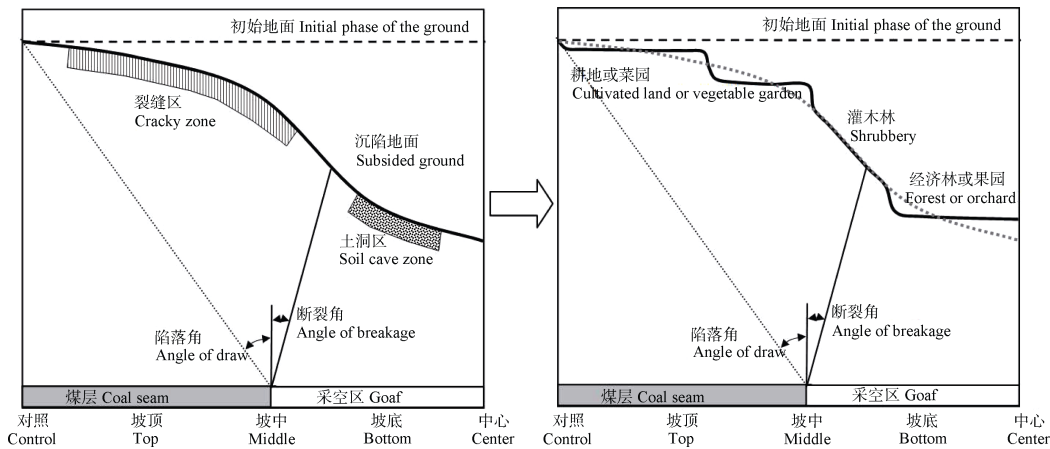


图1 低潜水位沉陷坡面土壤的非连续特征(左)与可持续管理(右)

Fig. 1 Discontinuity (L) and sustainable management (R) of soil in the subsidence slope low in phreatic water level

库损失^[18]。相对于东部高潜水位采煤沉陷区^[10-12]，中部和东北地区的地下水水位通常大于最大沉陷深度，坡底一般无积水，复垦土地利用管理具有更大的自由度，而土壤氮、磷和钾养分含量及其有效性研究并不多。在沉陷区的不同土地利用类型上，坡面土壤养分与水分迁移转化作用机理的差异性研究相对不足^[19-20]，进而新复垦土地并不能有效抑制土壤养分的进一步流失，难以整体实现沉陷区土壤的可持续管理。本研究以焦作九里山矿沉陷区的耕地和林地为研究对象，对土壤氮、磷和钾养分的含量和有效性在沉陷坡面和剖面深度上的空间变异性进行对比分析，对于沉陷区合理规划，促进矿区生态环境综合整治的科学决策有重要理论和实践价值。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

焦作九里山矿位于焦作市东北 18 km (39.34°N, 113.42°E)，海拔 97 m，属太行山山前平原冲洪积扇的边缘地带，总体地形平坦，地面坡度小于 0.5°。矿区年均气温 14.2℃，年均降水量 578 mm，年均蒸发量 993 mm^[21]，年均日照时数 2 062 h，是全国粮食高产产区之一。矿区主要土地利用类型为耕地，占比 78.2%，以冬小麦-夏玉米(大豆或花生)为作物；建筑道路工矿用地占比 19.5%；林地以速生杨为主，占比 2.3%。表土为石灰性褐土，质地为壤土-黏壤土，土体深厚(13~45 m)，地下水埋深为 15 m 左右。

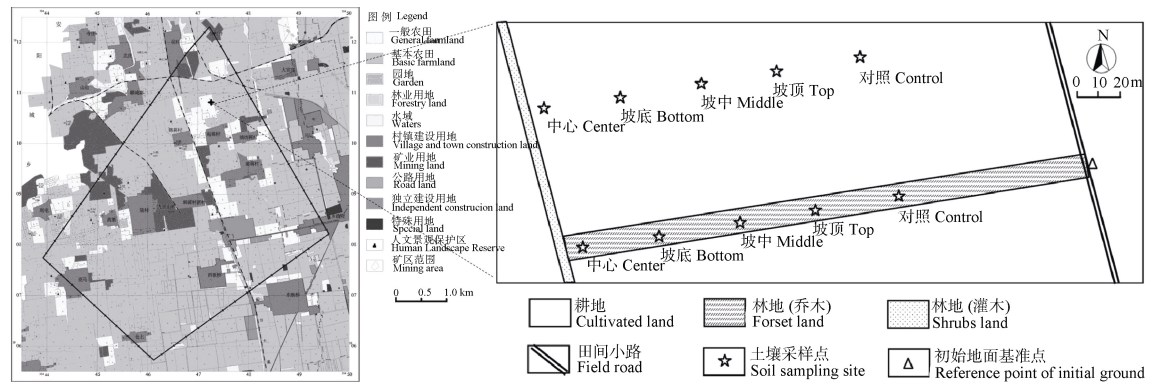
1.2 样品采集与分析

位于矿区东北角的沉陷坑直径超过 800 m，深

度为 6.5 m，2000 年开始沉陷，2005 年后达到初步稳定，是典型的平原型采煤沉陷坑。坑内及周边以种植冬小麦-夏玉米为主，年均施肥量：化肥 N 200 kg·hm⁻²，P 30 kg·hm⁻²，有机肥约 10 t·hm⁻²。从坑中心到东侧边缘有一带状 270 m×10 m 速生杨次生林，为沉陷初期由耕地变更成，种植密度 3.0 m×1.5 m，林龄 18 a，胸径 15~38 cm。林下生长小叶槐(*Sophora microphylla*)、酸枣(*Ziziphus jujuba* Mill.)、构树(*Broussonetia papyrifera*)和怪柳(*Tamarix chinensis* Lour.)等灌木，黄花蒿(*Artemisia annua* Linn.)等杂草。从坑中心到边缘自西向东每隔 40 m 共布置 5 个土壤采样点，分别对应中心、坡底、坡中、坡顶和对照(距沉陷坑东侧边缘基准点沉降 0.4 m，因其地面坡度小于 1°且无裂缝分布，将其视作为对照)，距林地北侧 60 m，等高布置对应的 5 个耕地采样点，如图 2 所示。土壤采样点具体信息见表 1。

土壤样品采集于 2015 年 4 月份，采样日的 7 d 前刚经历一场中雨。单个采样点的 1 m 范围内平均布置 5 个钻孔，钻孔避开裂缝且距离树干大于 0.5 m，用直径 38 mm 土钻，每 10 cm 一层，共采集 5 个土层(0~10、10~20、20~30、30~40、40~50 cm)，单个采样点同层的 5 个钻孔土壤混合，剔除石块和植物根系，再通过 2 mm 筛，采用四分法形成 1 个土壤样品。共采集 50 个土壤样品。取 100 g 鲜土密封后冰箱内冷冻保存，用于测量土壤有效氮。

取 1 kg 样品风干后密封保存。取风干土 100 g，研磨，通过 80 目筛后密封保存，用于测量土壤全氮(KMnO₄+Fe(II)+H₂SO₄消解—凯氏定氮法^[22])、



注：左图为河南省九里山矿边界；右图为采样点布置方案。Note: Left: Boundary of the Jiulishan mine in Henan Province; Right: Layout of the soil sampling points.

图 2 采样点位置概况图

Fig. 2 Overview of the location of the sampling points

表 1 土壤采样点基本情况

Table 1 Basic information of the soil sampling sites

坡位	距中心距离	海拔	坡度	裂缝分布 ¹⁾
Slope position	Distance from center /m	Altitude/m	Slope gradient/°	Crack distribution
中心 Center	0	90.53	2.18	无裂缝 No crack
坡底 Bottom	40	92.06	3.24	裂缝和土洞 Cracks and holes
坡中 Middle	80	94.33	1.61	裂缝大量分布 Distribution of a large number of cracks
坡顶 Top	120	95.45	1.38	少量长裂缝 A small amount of long fissures
对照 Control	160	96.41	0.59	无裂缝 No crack

注：1) 此列为林地裂缝分布；耕作行为导致耕地裂缝表观不明显。Note: 1) This column indicates distribution of cracks in forest land; Cracks in the cultivated land caused by tillage are inconspicuous.

全磷 (NaOH 熔融—钼锑抗比色法^[22])、全钾 (NaOH 熔融—火焰原子吸收法^[22])、有效磷 (NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法^[22]) 和速效钾 (NH₄OAc 浸提—火焰原子吸收法^[22])。另取 1 (±0.001) g 风干土 3 份采用重量法测量风干土含水率^[22]。

土壤的热水提取物作为一个标准的、敏感的土壤质量指示指标,可反映土壤有效态养分的组成^[23],本文采用热盐水提取氮作为土壤有效氮。具体步骤为:取 30 (±0.001) g 鲜土置于 300 mL 三角瓶中,加入 150 mL 的 100 g·kg⁻¹氯化钠溶液 (70℃),振荡 30 min,静止 18 h 后将上清液通过 0.45 μm 微孔滤膜过滤,冰箱 4℃ 保存滤液。分别取合适体积液体测试总氮 (过硫酸钾消解-分光光度法^[24])、铵态氮 (纳氏比色法^[24])、硝态氮 (酚二磺酸分光光度法^[24])。溶解性有机态氮 (DON) 等于液体总氮减去铵态氮 (NH₄⁺-N) 和硝态氮 (NO₃⁻-N) 含量。另取 5 (±0.01) g 鲜土 3 份采用重量法测量鲜土含水率^[22]。

土壤养分测量结果用含水率校正为干基养分含量。

土壤养分有效性等于有效态养分含量占对应全量养分含量的百分比,文中 AN/TN、AP/TP 和 AK/TK 分别用于表示土壤氮、磷和钾有效性。

1.3 数据处理

采用 SPSS Statistics 17.0 软件的一般线性模型 (GLM) 单变量-主效应模型进行土壤全氮、全磷、全钾、有效氮、有效磷和速效钾含量在土地利用类型 (耕地和林地)、沉陷坡位 (中心、坡底、坡中、坡顶和对照) 和土壤剖面 (0~10、10~20、20~30、30~40、40~50 cm) 3 个因素的基于估算边际均值间线性独立成对比较。同土壤层 (或坡位) 土壤理化指标在不同土地利用类型 (耕地和林地) 的差异分析采用 SPSS 中配对样品 *T* 检验模型。数据变异性小于 10% 为弱变异; 10%~30% 为中等变异; 大于 30% 为强变异^[25]。

2 结果

2.1 沉陷区土壤全量养分含量的空间变异性

沉陷区土壤全氮、磷和钾含量如表 2 所示。土壤全氮、磷和钾含量分别处于 4 级偏低 ($0.75 \sim 1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、2 级丰富 ($0.8 \sim 1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 3 级正常 ($15 \sim 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 水平^[26], 整体变异性由大到小依次为: 全氮 (41%)、全磷 (19%)、全钾 (4%), 分别为强变异、中等变异和弱变异。林地土壤全磷含量较耕地显著 ($P < 0.001$) 降低 $0.17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而全氮和全钾含量在 2 种土地利用类型间无显著差异。在沉陷坡

位上, 与对照相比, 其他点位全磷含量均显著 ($P < 0.01$) 降低 $14.7\% \sim 17.6\%$; 全钾含量仅在中心点位有显著 ($P < 0.01$) 降低, 降低幅度为 5.8% 。在土壤剖面层上, 全氮和全磷表现为显著 ($P < 0.001$) 的表层聚集效应, 而全钾却表现为一定的表层降低。表层 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 土壤全氮、磷和钾含量分别为深层 $40 \sim 50 \text{ cm}$ 的 2.64 倍、1.36 倍和 96%。

2.2 沉陷区土壤有效态养分含量的空间变异性

如表 2 所示, 沉陷区土壤有效氮、磷和钾含量整体变异性由大到小依次为: 有效磷 (118%)、有效氮 (69%)、速效钾 (27%), 分别为强变异、强变

表 2 沉陷区土壤全量和有效态养分含量

Table 2 Contents of total and available nutrients in the soil of the subsidence area

项目 Item	全氮 Total N/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷 Total P/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全钾 Total K/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效氮 Available N/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷 Available P/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available K/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
土地利用类型 Type of land use						
耕地 Cultivated land	0.792±0.269a	0.982±0.187a	15.15±0.54a	13.39±11.28a	12.42±12.06a	51.06±7.19b
林地 Forest land	0.823±0.386a	0.812±0.096b	14.93±0.72a	15.93±8.72a	3.99±3.24b	62.50±18.63a
<i>F</i> 值 <i>F</i> value ^{a)}	0.596	35.74	1.773	1.803	25.60	21.07
显著性 <i>P</i> Sig. <i>P</i>	0.445	<0.001	0.191	0.187	<0.001	<0.001
沉陷坡位 Subsidence slope position						
中心 Center	0.897±0.365a	0.899±0.171b	14.39±0.59b	21.84± 8.26a	6.23±7.18a	59.94±14.71a
坡底 Bottom	0.778±0.314a	0.849±0.130b	14.91±0.74a	15.39±13.64b	6.53±6.62a	57.21±12.35a
坡中 Middle	0.752±0.334a	0.890±0.132b	15.16±0.58a	14.06±10.16b	9.08±10.15a	55.79±13.74a
坡顶 Top	0.807±0.435a	0.861±0.151b	15.36±0.53a	10.70±7.76b	10.06±14.02a	55.13±17.96a
对照 Control	0.797±0.322a	1.030±0.249a	15.27±0.57a	11.34±6.68b	8.41±9.45a	57.98±20.27a
<i>F</i> 值 <i>F</i> value ^{a)}	1.109	5.092	4.704	4.423	0.895	0.348
显著性 <i>P</i> Sig. <i>P</i>	0.366	0.002	0.003	0.005	0.476	0.844
土壤剖面层 Layer of soil profile						
0~10 cm	1.308±0.272a	1.043±0.194a	14.80±0.69b	25.94±11.48a	19.15±11.63a	76.90±21.42a
10~20 cm	0.942±0.120b	0.964±0.160ab	14.90±0.74b	19.02±8.06b	13.47±9.56b	54.06±8.05b
20~30 cm	0.718±0.110c	0.905±0.118b	15.15±0.46ab	10.55±4.30c	5.15±3.69c	51.92±5.88b
30~40 cm	0.574±0.089cd	0.806±0.107c	15.42±0.62a	9.04±6.87c	1.95±1.20c	50.25±6.29b
40~50 cm	0.496±0.101d	0.766±0.105c	14.95±0.62ab	8.76±5.76c	1.30±0.54c	50.79±8.46b
<i>F</i> 值 <i>F</i> value ^{a)}	44.82	12.50	2.204	12.84	19.54	12.76
显著性 <i>P</i> Sig. <i>P</i>	<0.001	<0.001	0.086	<0.001	<0.001	<0.001

注: 同列相同字母表示同一因素内不同水平间无显著性差异; a) 该检验基于估算边际均值间的线性独立成对比较。Note: The same letters in the same factor column mean insignificant difference between different levels (Duncan, $P=0.05$). a) The test is based on linear independent paired comparison of the estimated marginal mean values.

异和中等变异。林地土壤有效磷含量较耕地有显著 ($P<0.001$) 下降, 下降比例为 68%; 而林地土壤速效钾含量较耕地有显著 ($P<0.001$) 升高, 升高比例为 22%; 有效氮含量在 2 种土地利用类型间无显著差异。在沉陷坡位上, 与对照相比, 有效氮含量仅在中心点位有显著 ($P<0.01$) 升高, 升高比例为 93%, 且整体上随着沉陷深度的增加而增加, 在坡底和中心处快速积累。在土壤剖面层上, 有效氮、磷和钾均表现为显著 ($P<0.001$) 的表层聚集效应, 表层 0~10 cm 土壤有效氮、磷和钾含量分别为深层 40~50 cm 的 2.96 倍、14.7 倍和 1.51 倍。

从有效氮的组成来分析 (图 3), 林地铵态氮含

量较耕地显著 ($P<0.05$) 升高 $4.97 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 硝态氮和有机态氮在两种土地利用类型间均未达到显著差异。随着沉陷深度的增加, 耕地土壤溶解性有机态氮积累的程度线性增加, 坡中、坡底和中心处溶解性有机态氮含量分别为对照处的 8 倍、16 倍和 20 倍; 林地土壤铵态氮仅在中心处有明显积累, 相对对照增加 89%。在土壤剖面层上, 溶解性有机态氮在耕地表层 0~10 cm 和 10~20 cm 均有明显的积累效应, 而仅在林地表层 0~10 cm 有明显的积累效应, 分别为对应深层 40~50 cm 土壤的 4.14 倍、6.38 倍和 9.00 倍。与表层 0~10 cm 相反, 亚表层和深层土壤铵态氮含量在林地较耕地有显著 ($P<0.05$) 升高。

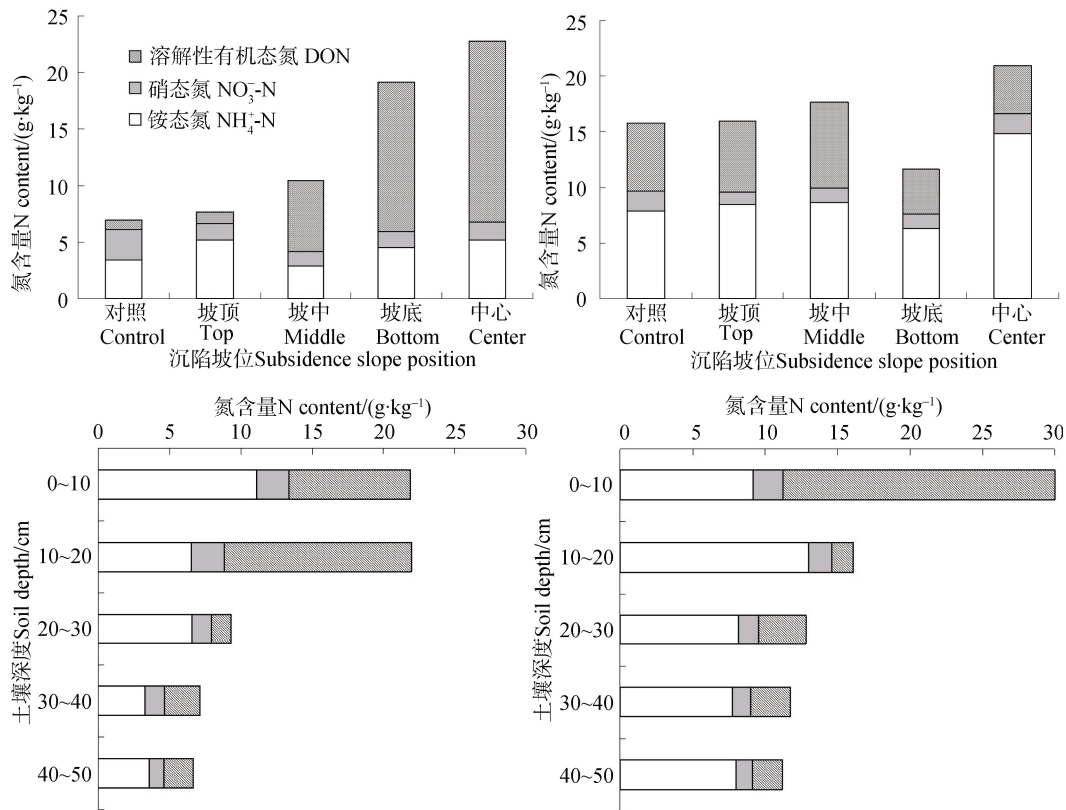


图 3 沉陷区土壤有效氮组成的差异性 (左图为耕地, 右图为林地)

Fig. 3 Differences in the composition of soil available nitrogen between cultivated land (L) and forest land (R)

2.3 沉陷区土壤养分有效性的空间变异性

沉陷区土壤氮、磷和钾有效性的空间变化趋势如图 4 所示。除 30~40 cm 土层外, 氮有效性在耕地和林地间均无显著性差异。在对照处, 林地土壤氮有效性显著 ($P<0.05$) 高于耕地, 前者约是后者的 2.7 倍。随着沉陷深度的增加, 耕地土壤氮有效性在所有土层均表现为明显增加趋势, 在坡底或中

心处达到最大值, 为对照的 2.2 倍~3.7 倍; 林地土壤氮有效性仅在表层表现出随沉陷深度的轻微增加趋势, 在 40~50 cm 土层反而呈明显减小趋势。在土壤剖面上, 氮有效性在耕地和林地均无明显表层聚集效应。

与耕地相比, 林地磷有效性在各土壤层均偏低, 在表层 0~30 cm 均达到显著 ($P<0.05$) 水平。随着

沉陷深度的增加,林地磷有效性在表层 0~20 cm 略呈增加趋势;而耕地在所有土壤层均呈降低趋势,在表层 0~20 cm 降低幅度最大,中心处最小值较坡顶处最大值显著 ($P<0.05$) 降低 1.55%~1.85%。在土壤剖面上,耕地磷有效性表层聚集效应明显大于林地,耕地和林地表层 0~10 cm 磷有效性分别为对应深层 40~50 cm 的 14 倍和 6.3 倍。

与耕地相比,林地钾有效性在各土壤层均偏高,在表层 0~10 cm 和深层 30~40 cm 达到显著水平,升高幅度分别为 0.25% ($P<0.01$) 和 0.07% ($P<0.05$)。随着沉陷深度的增加,钾有效性在耕地表层 0~20 cm 和林地深层 30~50 cm 均呈增加趋势。在土壤剖面上,林地钾有效性表层 0~10 cm 聚集效应明显大于耕地,林地和耕地表层 0~10 cm 钾有效性分别为对应深层 40~50 cm 的 1.7 倍和 1.3 倍。

3 讨 论

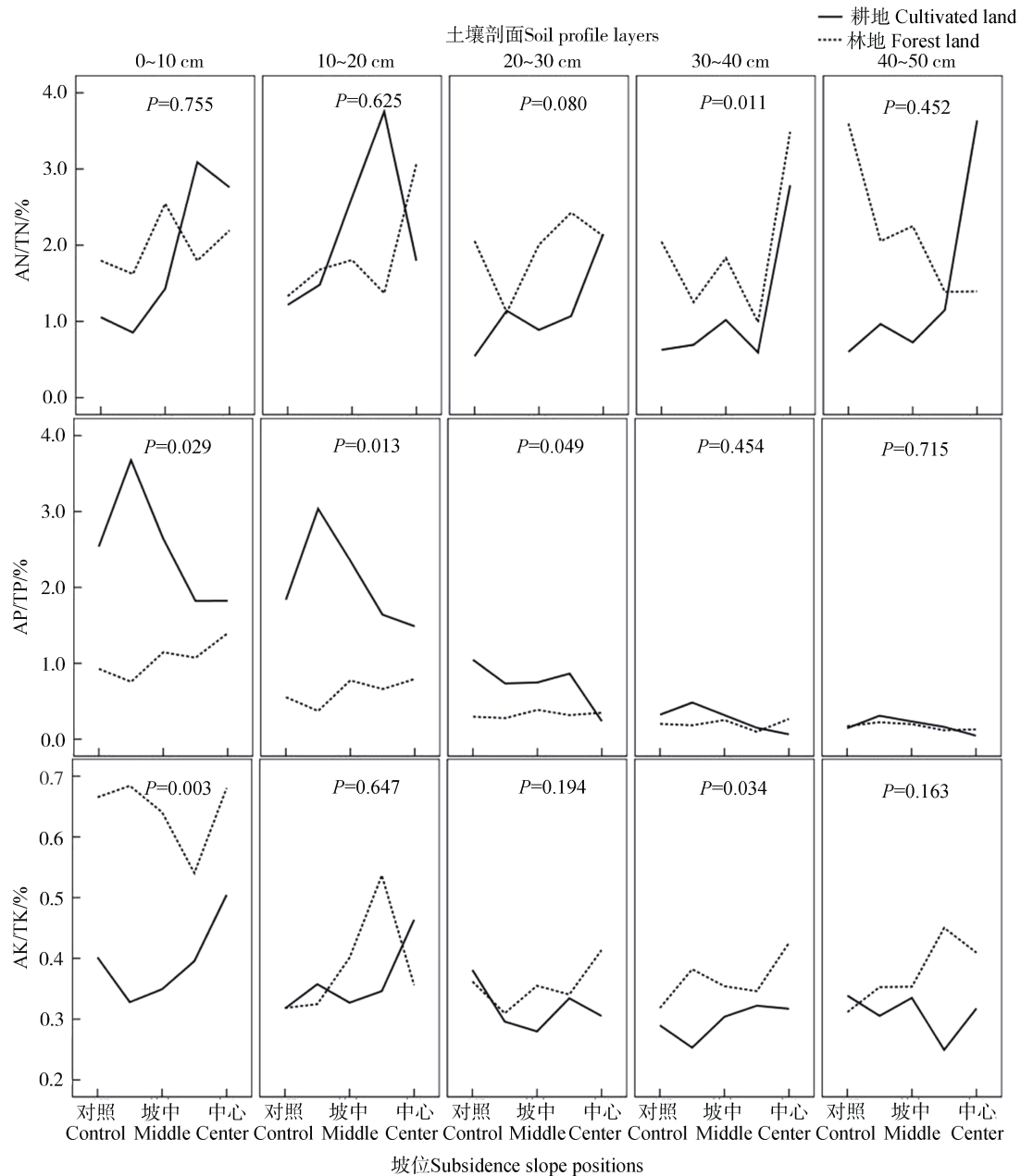
3.1 沉陷区土壤养分有效性空间变异的作用机理

通常情况下,耕地改为林地后,生态系统氮输入途径由施氮肥为主转为氮沉降为主,系统由氮盈余状态逐渐转向氮限制状态,土壤微生物和植物对土壤氮的转化利用效率会增加,土壤氮的矿化潜势和硝化潜势增加^[14, 23],土壤氮有效性升高。本研究对照处,林地土壤氮有效性为耕地的 2.7 倍(图 4),并且增加的有效氮含量以铵态氮和溶解性有机态氮为主,硝态氮占比下降(图 3)。然而,沉陷区土壤全氮、有效氮含量和氮有效性在耕地和林地间并无显著差异(表 2)。这主要是由于随着沉陷深度的增加,耕地溶解性有机态氮含量线性增加,土壤有效氮含量和氮有效性因此增加,在坡底或中心处,氮有效性反而超过林地。这种沿沉陷坡度逐渐增强的土壤氮激发效应,侧面反映了耕地生态系统对外源施入氮肥的利用效率降低,颗粒态铵态氮^[11]和溶解性有机态氮可能是耕地地表径流氮流失的主要形态。在土壤剖面上,有效态氮在耕地 0~20 cm 和林地 0~10 cm 的表层聚集效应反映了土壤氮矿化潜势和硝化潜势明显高于其他土壤层,这与沉陷区土壤有机质的剖面特征相类似^[10]。

沉陷区由耕地改为林地后,生态系统磷输入流可完全忽略,而磷在林木体内蓄积增加了对原有土

壤磷库的持续消耗^[27],林地土壤全磷含量、有效磷含量和磷有效性均较耕地有显著 ($P<0.001$) 降低,降低幅度分别为 $0.17 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $8.43 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.68% (表 2 和图 4)。在沉陷坡面上,与对照相比,其他点位全磷含量均显著 ($P<0.01$) 降低 14.7%~17.6%,表明采煤沉陷导致的坡度增加引起了地表径流磷流失量增加,颗粒吸附态磷可能是主要流失形态^[11]。裂缝的垂直截留作用会削弱林地地表径流磷流失,林地中间坡面区 0~10 cm 土层全磷含量较其对照处升高 $0.11 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;耕作行为对裂缝的封堵反而会促进耕地地表径流磷流失,坡面上 0~10 cm 土层全磷含量反而较耕地对照处降低 $0.19 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与 Tripathi 等^[14]的研究一致,林地表层土壤有效磷含量和磷有效性在坡底和中心处的凹陷区最大,坡面处最小。与此相反,随着沉陷深度的增加,耕地表层 0~20 cm 土壤有效磷含量和磷有效性在坡顶处达到最大值,在中心处达到最小值,这与 Guo 等^[15]的研究中土壤盐分在坡顶富集、有效磷在坡中富集的规律基本一致。尽管裂缝在耕地表面不明显,但仍然会增加土壤氧化还原电位,利于磷的矿化和释放,土壤有效磷含量和磷有效性达到最大值;坡底和中心处形成土洞区或者形成淹水区会降低土壤氧化还原电位,利于磷的闭蓄和固定^[28],土壤有效磷含量和磷有效性达到最小值。

耕地施用有机肥会产生少量钾输入流,然而与宏大的土壤无机钾库相比则可忽略不计,因此土壤全钾含量在林地和耕地间无显著差异(表 2)。土壤全钾在沉陷区中心处和表层 0~20 cm 的显著降低现象可解释为土壤有机质对全钾的稀释效应^[29]。与全钾相反,林地土壤速效钾含量较耕地显著 ($P<0.001$) 升高 $11.44 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,以及速效钾在土壤剖面有明显表层聚集效应。皮尔森(Pearson)相关分析表明,土壤速效钾含量与有效氮、全氮含量显著正相关 ($P<0.01$),相关系数分别为 0.571 和 0.748。土壤速效钾含量显著影响土壤反硝化微生物种群的多样性和作物产量^[30]。在沉陷坡面上,耕地钾有效性在坡顶或坡中的裂缝区达到最小值,在坡底或中心处的凹陷区达到最大值,可解释为地表径流的夹带效应使耕地速效钾沿坡面水平流失;林地坡底处土壤钾有效性在表层 0~10 cm 最低,在深层 40~50 cm 反而最高,可解释为在坡底土洞区林地速效钾有垂直渗漏发生。



注： P 值表示耕地和林地同一土壤层养分有效性配对 T 检验概率；AN/TN、AP/TP 和 AK/TK 分别表示土壤氮、磷和钾的有效性。Note: P stands for probability of the paired T -test of soil nutrient availability in the same soil layers of the cultivated land and forest land; AN/TN, AP/TP and AK/TK indicate soil available N, P and K versus total N, P and K, respectively.

图 4 沉陷坡面土壤养分有效性的空间变化趋势

Fig. 4 Trends of the spatial variation of soil nutrient availability in the subsidence slope

3.2 沉陷区土壤的可持续管理

无论是耕地还是林地，目前单一类型的土地利用管理均难以适应沉陷区土壤养分和水分的高空间变异性，在沉陷坡面的不同点位发生明显的土壤养分和水分流失，难以整体实现沉陷区土壤的良性演替。沉陷区土壤的可持续管理就是根据沉陷区土壤

养分和水分迁移转化和流失的规律，于沉陷初期在不同坡位选择有利于土壤良性演替的土地利用类型的规划与管理，以降低地下采矿对周围生态环境的不利影响^[7,15]。在我国中部和东北地区的低潜水位沉陷区，土壤养分和土壤水分的运移规律具有一定的交互作用^[18]，空间富集特点和流失途径不完全相同。

沉陷坡度引起地表径流增加, 会加剧土壤氮、磷和钾养分的地表水平流失; 坡面裂缝会阻碍土壤养分的地表水平流失, 增加垂直流失风险; 土地整理和耕作行为可起到对裂缝的有效封堵, 部分掩盖沉陷坡面上土壤氮钾养分和水分的垂直流失^[11,31]。

在沉陷初期, 如图 1 (左) 中断裂角以下的凹陷区快速形成, 陷落导致土体疏松, 形成土洞空穴, 土壤有机质分解加速, 土壤水分和有效态养分增加^[32-33]。断裂角以上至坡中处的坡面区发生非形变倾斜, 土壤密度增加, 导水率下降, 形成明显地表径流, 携带黏粒和养分流向凹陷区, 土壤质地趋向砂化, 土壤水分和养分含量迅速降低^[10]。坡中以上区域由于水平拉伸张力的作用形成裂缝区, 并逐渐扩展至陷落角边缘, 裂缝为土壤水分和养分开辟了垂直流失的途径, 耕地表层土壤的氮和钾有效性降低, 磷有效性反而增加。根据沉陷区不同坡位土壤养分和水分迁移的特点, 分区合理规划, 以实现沉陷区土壤的可持续管理。在中间坡面区, 最适宜的土地复垦方向是灌木林, 丰富的根系能起到良好的水土保持效果, 削弱地表径流形成和土壤养分水平流失; 在凹陷区, 适当土地平整后可发展为经济林或果园, 疏松的土壤和充足的养分有利于乔木细根发育^[14]; 在坡顶裂缝区, 裂缝会引发树木倾倒、断根、细根生物量减少甚至植株死亡现象^[14], 通过等高程造陇、微梯田构造和喷灌设施建设将其改造为高产的耕地或菜园, 弱化沉陷坡度对土壤氮、磷和钾养分水平流失的影响, 在施用氮肥的同时, 适当补充磷钾肥和有机肥。如图 1 (右) 所示, 最终实现采煤沉陷区土地复垦改造的最小经济投入目标。

4 结论

在我国中部和东北地区典型的低潜水位采煤沉陷区, 土壤氮磷钾全量养分和有效态养分含量在土地利用类型、沉陷坡面和土壤剖面 3 个空间因素上均存在明显的变异性。相对于耕地, 林地全磷和有效磷含量显著 ($P < 0.001$) 降低, 速效钾含量显著 ($P < 0.001$) 升高。在沉陷坡面上, 耕地土壤氮和钾的有效性在坡底凹陷区最大, 而磷有效性在坡顶裂缝区处最大; 林地土壤氮、磷和钾的有效性均在坡底凹陷区最大, 在中间坡面区最小。耕地土壤溶解性有机态氮和速效钾随地表径流流失, 裂缝增加耕

地土壤氧化还原电位利于磷的矿化与释放, 林地土壤速效钾在坡底凹陷区的垂直渗漏等解释了沉陷区土壤养分有效性的高空间变异性。根据沉陷坡面不同点位土壤养分和水分迁移转化规律, 坡顶裂缝区、中间坡面区和坡底凹陷区分别改造为高产的耕地或菜园、灌木林和经济林或果园, 以实现低潜水位采煤沉陷区土壤的可持续管理和土地复垦改造的最小经济投入目标。

参考文献 (References)

- [1] National Bureau of Statistics. China energy statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019. [国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴-2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.]
- [2] National Development and Reform Commission. The 13th "Five Year Plan" for the coal industry development (Public release) [OL] [2016-12-31]. <http://www.ndrc.gov.cn/fzgggz/fzgh/ghwb/gjjgh/201706/W020170605639770457747.pdf> [国家发展和改革委员会. 煤炭工业发展“十三五”规划(公开发布稿) [OL] [2016-12-31] <http://www.ndrc.gov.cn/fzgggz/fzgh/ghwb/gjjgh/201706/W020170605639770457747.pdf>]
- [3] Zhao M P, Zhang Z B, Zhou L D. The influence of land collapse on land productivity in Fuxin diggings [J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14 (1): 77—80. [赵明鹏, 张震斌, 周立岱. 阜新矿区地面塌陷灾害对土地生产力的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14 (1): 77—80.]
- [4] Lechner A M, Baumgartl T, Matthew P, et al. The impact of underground longwall mining on prime agricultural land: A review and research agenda[J]. Land Degradation & Development, 2016, 27 (6): 1650—1663.
- [5] Zhou Y, Zhou W, Bai Z K. The damaged lands and their reclamation potential in mining districts[J]. Resources & Industries, 2013, 15 (5): 100—107. [周妍, 周伟, 白中科. 矿产资源开采土地损毁及复垦潜力分析[J]. 资源与产业, 2013, 15 (5): 100—107.]
- [6] Hu Z Q, Zhang R Y, Chugh Y P, et al. Mitigating mine subsidence dynamically to minimise impacts on farmland and water resources: A case study[J]. International Journal of Environment and Pollution, 2016, 59 (2/3/4): 169.
- [7] Howladar M F, Hasan K. A study on the development of subsidence due to the extraction of 1203 slice with its associated factors around Barapukuria underground coal mining industrial area, Dinajpur, Bangladesh[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72 (9): 3699—3713.
- [8] Zhou D W, Wu K, Miao X X, et al. Combined prediction model for mining subsidence in coal mining areas covered with thick alluvial soil layer[J]. Bulletin of

- Engineering Geology and the Environment, 2018, 77(1): 283—304.
- [9] Luo X J. Further discussion on mechanism of covered Karst ground collapse[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(5): 886—895. [罗小杰. 也论覆盖型岩溶地面塌陷机理[J]. 工程地质学报, 2015, 23(5): 886—895.]
- [10] Meng H Q, Xiong R P, Wang C, et al. Spatial variability of soil moisture, organic matter content and soil texture in coal mining subsidence area as affected by land use[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(4): 911—922. [孟红旗, 熊仁鹏, 王崇, 等. 采煤沉陷区不同土地利用类型土壤水分、有机质和质地的空间变异性[J]. 土壤学报, 2018, 55(4): 911—922.]
- [11] Chen X Y, Zhou Y Z, Yu J H, et al. Temporal-spatial distribution and loss characteristics of nitrogen and phosphorus from sope farmland in coal mining subsidence areas with lime concretion black soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(2): 236—240, 245. [陈孝杨, 周育智, 于佳禾, 等. 砂姜黑土区采煤塌陷坡耕地氮磷时空分布与流失特征[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 236—240, 245.]
- [12] Yao J J, Gao L M, Yao S P. Nitrogen speciation and bioavailability in the soil of coal mining subsided area[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2015, 35(1): 11—15. [姚健健, 高良敏, 姚素平. 采煤塌陷区土壤中氮形态分析及生物有效性[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2015, 35(1): 11—15.]
- [13] Yu H F, Gao L M, Li Y, et al. Spatial distribution characteristics of soil nutrients in Pansan coal mining collapse areas in Huainan[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2012, 40(12): 143—145. [俞海防, 高良敏, 李玉, 等. 淮南潘三采煤塌陷区土壤的养分分布特征[J]. 贵州农业科学, 2012, 40(12): 143—145.]
- [14] Tripathi N, Singh R S, Singh J S. Impact of post-mining subsidence on nitrogen transformation in southern tropical dry deciduous forest, India[J]. Environmental Research, 2009, 109(3): 258—266.
- [15] Guo X M, Zhao T Q, Chang W K, et al. Evaluating the effect of coal mining subsidence on the agricultural soil quality using principal component analysis[J]. Chilean Journal of Agricultural Research, 2018, 78(2): 173—182.
- [16] Chen Q J, Kong Y F, Liu C H, et al. Changes of nutrient in subsidence land based on emergy[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(6): 2125—2128. [陈秋计, 孔云峰, 刘昌华, 等. 基于能值理论的开采沉陷地养分变化研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(6): 2125—2128.]
- [17] Zhang H B. Effects of the surface cracks caused by coal mining on soil characteristics and wheat growth in Huang-Huai-Hai Plain, China[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2017, 15(4): 1777—1790.
- [18] Nie X J, Lü Y, Liu C H, et al. Impacts of land-use and ground fissure on soil nutrients in coal-mining subsidence landscapes[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2017, 36(3): 73—78, 91. [聂小军, 吕洋, 刘昌华, 等. 土地利用与裂缝对采煤沉陷土壤养分的影响[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2017, 36(3): 73—78, 91.]
- [19] Zhu Y C, Wang J M, Bai Z K, et al. Recent research progresses of influences of coal mining subsidence on soil physical and chemical properties[J]. Soils, 2016, 48(1): 22—28. [祝宇成, 王金满, 白中科, 等. 采煤塌陷对土壤理化性质影响的研究进展[J]. 土壤, 2016, 48(1): 22—28.]
- [20] Li S J, Wang J M, Wan D P, et al. Micro-landform modification and its application in coal-mining subsidence area: A review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(6): 1612—1619. [李斯佳, 王金满, 万德鹏, 等. 采煤沉陷地微地形改造及其应用研究进展[J]. 生态学杂志, 2018, 37(6): 1612—1619.]
- [21] Du Q, Zhang Y. Characteristics of climate change of Jiaozuo City in 1951—2010[J]. Yellow River, 2014, 36(1): 61—64. [杜琼, 张勇. 焦作市 1951—2010 年气候变化特征分析[J]. 人民黄河, 2014, 36(1): 61—64.]
- [22] Bao S D. Soil and agro-chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [23] Xue S, Li P, Liu G B, et al. Changes in soil hot-water extractable C, N and P fractions during vegetative restoration in Zhifanggou watershed on the Loess Plateau[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(12): 2250—2259.
- [24] State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring and analysis methods (Supplemental Edition)[M]. Beijing: China Environment Science Press, 2002. [国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]
- [25] Zhang C Z. Environmental planning and management [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007. [张承中. 环境规划与管理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.]
- [26] National Soil Survey Office. Chinese soil [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998. [全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.]
- [27] Yu T Y, Li Y Y, Pang H C, et al. Effects of long-term no phosphorus fertilization to upland red soil nutrients ratio and maize yield[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2010(2): 25—28. [于天一, 李玉义, 逢焕成, 等. 长期不施磷肥对旱地红壤养分比例与玉米产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2010(2): 25—28.]
- [28] Chen X Y, Wang S, Hu Y B, et al. Nutrient release potential of sediment and its adjacent inundated soils in the initial-stage of coal Mine subsidence waters[J].

- Environmental Chemistry, 2016, 35 (9): 1884—1893. [陈孝杨, 王顺, 胡友彪, 等. 初期采煤沉陷积水区底泥及周边土壤覆水条件下营养盐释放潜能[J]. 环境化学, 2016, 35 (9): 1884—1893.]
- [29] Sun W B, Liao X F, Tian F, et al. Comparison study on soil chemical properties of different coal mining subsidence sites in hundred-Mile *Rhododendron* forest zone of Guizhou Province[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2014, 34 (9): 55—59. [孙文博, 廖小锋, 田凡, 等. 贵州百里杜鹃林区不同采煤塌陷年限土壤化学性质对比研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34 (9): 55—59.]
- [30] Liu Y, Zhu J R, Ye C Y, et al. Effects of biochar application on the abundance and community composition of denitrifying bacteria in a reclaimed soil from coal mining subsidence area[J]. Science of the Total Environment, 2018, 625: 1218—1224.
- [31] Zhao H M, Zhang F W, Song Y X, et al. Spatial variation of soil moisture content in mining subsidence areas of DaLiuta, Shenmu County, shannxi Province[J]. Journal of Geo-Information Science, 2010, 12 (6): 753—760. [赵红梅, 张发旺, 宋亚新, 等. 大柳塔采煤塌陷区土壤含水量的空间变异特征分析[J]. 地球信息科学学报, 2010, 12 (6): 753—760.]
- [32] Jing Z R, Wang J M, Zhu Y C, et al. Effects of land subsidence resulted from coal mining on soil nutrient distributions in a loess area of China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 177: 350—361.
- [33] Zhang H Z, Zhu Q K, Wang J, et al. Soil physical properties of micro-topography on loess slope in north Shaanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31 (6): 55—58. [张宏芝, 朱清科, 王晶, 等. 陕北黄土坡面微地形土壤物理性质研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31 (6): 55—58.]

(责任编辑: 陈荣府)