

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.04.011

陈雪, 胡海波, 王灿. 黄河故道农田防护林土壤养分变化特征及评价. 土壤, 2023, 55(4): 779–786.

黄河故道农田防护林土壤养分变化特征及评价^①

陈雪^{1,2}, 胡海波^{1,2*}, 王灿³

(1 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037; 2 江苏省水土保持与生态修复重点实验室, 南京 210037; 3 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 土壤养分是土壤肥力的基础, 掌握其含量与分布特征可为改善立地条件、建设高效农田防护林体系提供科学依据。以盐城市阜宁县和淮安市涟水县黄河故道土壤为研究对象, 采用层次分析法(AHP)与物元分析模型相结合的方式, 分别对研究区内有林地和无林地土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾 7 个指标的变化特征进行了分析评价。结果表明: ①随着远离河堤, 土壤有机质、全氮、碱解氮、全钾、速效钾含量呈增加趋势; 全磷含量呈减少趋势; 有效磷在有林地呈减少趋势, 在无林地呈增加趋势。②有林地土壤有机质(2~3 级)、全氮(1~2 级)含量显著高于无林地, 而其余指标与无林地基本一致。③在距黄河故道 <0.5、0.5~1.0 和 1.0~1.5 km 3 个区域内, 有林地土壤养分等级分别为较丰富 II、丰富 I、丰富 I, 无林地土壤养分等级分别为贫乏 IV、适量 III、适量 III。可见, 开展农田防护林建设能有效促进土壤有机质、氮素的积累, 提升土壤养分等级, 若在此基础上合理追施磷肥, 能进一步提高土壤肥力及其生态、经济效益。

关键词: 黄河故道; 阜宁; 土壤养分; 空间变化

中图分类号: S727.24 文献标志码: A

Characteristics and Evaluation of Soil Nutrients in Farmland Shelter Forest of Yellow River Old Course

CHEN Xue^{1,2}, HU Haibo^{1,2*}, WANG Can³

(1 Co-Innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2 Jiangsu Province Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration, Nanjing 210037, China; 3 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Soil nutrients are the basis of soil fertility, and understanding their contents and distribution characteristics can provide a scientific basis for improving soil conditions and building an efficient farmland shelter forest system. In this study, the regional soils of the Yellow River old course in Funing and Lianshui counties, Yancheng City were taken as the research objects, and hierarchical analysis (AHP) and material element analysis model were combined to analyze and evaluate soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK), alkali-hydrolyzable nitrogen (AN), available phosphorus (AP), and available potassium (AK). The results show that: 1) As far away from the embankment, SOM, TN, AN, TK and AK show increasing trends, TP shows a decreasing trend, while AP shows a decreasing trend in forest land and an increasing trend in non-forest land; 2) The levels of SOM (mainly in 2–3 grades) and TN (mainly in 1–2 grades) of forest land are significantly higher than that non-forest land, while no significant difference is found in the other nutrients between forest land and non-forest land; 3) Within the old Yellow River Road <0.5 km, 0.5–1.0 km and 1.0–1.5 km, soil nutrient levels are relatively rich II, rich I, and rich I for forest land, respectively, while are poor IV, moderate III and moderate III in non-forest land, respectively. In conclusion, the construction of farmland shelter forest can effectively promote the formation of SOM and improve the level of soil nutrients, and on this basis, proper application of phosphorus fertilizer can further improve soil fertility and promote the ecological and economic benefits.

Key words: Yellow River old course; Funing; Soil nutrients; Spatial change

^①基金项目: 江苏省 2021 年度碳达峰碳中和科技创新专项(BE2022305), 国家林业和草原局江苏长江三角洲森林生态系统定位研究项目(2020132077)和江苏省农业科技自主创新重点资金项目(CX(17)1004-2)资助。

* 通讯作者(huhb2000@aliyun.com)

作者简介: 陈雪(1996—), 女, 河北沧州人, 博士研究生, 主要从事水土保持方面的研究。E-mail: 727290259@qq.com

土壤是在成土因素长期作用下形成的分布复杂、具有一定肥力的时空连续体^[1]。土壤养分是植物生长发育所必需的营养元素,它不仅是土壤肥力的物质基础,也是土地评价的重要参数之一^[2-3]。近年来,国内外土壤工作者对土壤养分空间分布、级别评定等进行了大量报道,认为土壤养分的含量及分布特征是由一系列因子相互作用产生的,地形、海拔以及土地利用方式等因素都是导致土壤养分变化的重要因素。赵义博等^[4]对内蒙古胜利矿区土壤进行研究,发现有机质、碱解氮的高值区主要集中在矿区西部高程较高区域,低值区主要集中在矿区东部人为干扰较强区域。李有芳等^[5]对云南省玉溪柑橘园土壤进行研究,发现有机质、碱解氮基本处于贫乏水平,有效钾处于超标水平,有效磷处于丰富水平。董彩霞等^[6]对黄河流域梨园土壤进行研究,发现有机质、碱解氮含量较低,而有效磷、速效钾等富集现象明显。上述研究均为当地土壤改良以及林分管护提供了参考。目前,黄河故道立地条件差、树种单一、经营管理不当,严重影响了农田防护林的生态经济效能。本文通过研究黄河故道土壤养分变化特征,明确土壤养分含量等级,探讨土壤养分分布规律及其影响因素,旨在为建设高效农田防护林体系提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河故道是黄河长期南侵夺淮入海留下的黄泛带,西起河南省兰考东坝头,流经豫鲁皖苏四省,在滨海县入黄海^[7]。受黄河不断冲击的影响,黄河故道沿岸地势不断增高,并沿泛流方向延伸,逐步形成缓坡地势,其土壤受成土母质、地貌、水文以及耕作等

因素的影响,质地以粉细沙土为主,具有“湿则板、水则淌、风则扬”的特性^[8]。黄河故道自然植被极少,仅在村落附近可见人工栽培的落叶阔叶树种,常见的有杨树(*Populus deltoides*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、国槐(*Sophora japonica*)、苦楝(*Melia azedarach*)、垂柳(*Salix babylonica*)和白榆(*Ulmus pumila*)等。

本研究区位于江苏省北部盐城市阜宁县与淮安市涟水县交界的黄河故道(地理位置 33°41'N ~ 33°55'N, 119°28' E ~ 119°38' E, 全长 32.8 km)两侧,包含阜宁县的羊寨镇、芦蒲镇和涟水县的南集镇、唐集镇、石湖镇^[9]。该区属暖温带与北亚热带过渡区,季风性气候显著,年均气温 13.6 ~ 14.2℃,年均降水量 812 ~ 1 010 mm,无霜期 207 ~ 217 d。20 世纪 90 年代,为推动当地生态建设与经济发展,大力倡导植树造林,初步形成了沿沟渠路分布、以杨树为主的农田防护林带(网)。

1.2 研究方法

研究区土地利用类型分有林地和无林地。有林地样地的选择采用目视解译法,首先在 ArcGIS 软件中标记出完整的杨树农田防护林带作为待采样点,随后在现场进一步筛选。无林地样地为与林带相邻的空旷带状地块。

本研究共设置 6 条样线,依据距离废黄河远近布设样地,共设置 30 个有林地样地和 15 个无林地样地(表 1)。根据前人研究资料和野外现场调查^[9-10],废黄河影响范围在 1.5 km 之内,因此将样地设置在 1.5 km 范围内。根据离黄河故道不同距离,将样地分为 3 个梯度: <0.5、0.5 ~ 1.0、1.0 ~ 1.5 km,每个梯度分别有 10 个有林地样地和 5 个无林地样地。在各样地进行林分调查,记录位置、树高、胸径、林龄、海拔以及坡度等。

表 1 采样点基本信息
Table 1 Basic information of sample points

位置	有林地							无林地		
	采样点编号	树种	树高(m)	胸径(cm)	林龄(a)	海拔(m)	坡度(°)	采样点编号	海拔(m)	坡度(°)
<0.5 km	1 ~ 10	杨树	17.05	23.29	21	6	1.90	W1 ~ W5	6	2.01
0.5 ~ 1.0 km	11 ~ 20	杨树	14.93	23.75	20	5	1.38	W6 ~ W10	5	1.65
1.0 ~ 1.5 km	21 ~ 30	杨树	14.75	25.65	24	4	0.97	W11 ~ W15	4	1.28

本研究土样采集均在沟渠上进行,每个样地选 3 个样点取样,用环刀法分别取 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 深度的土壤混合后装入塑料袋,带回实验室自然风干后进行研磨、过筛,测定土壤养分指标。土壤有机质(SOM)含量采用重铬酸钾氧化-油浴加热法进行测

定;全氮(TN)含量采用元素分析仪测定;全磷(TP)采用高氯酸-硫酸熔融-分光光度法测定;全钾(TK)采用氢氟酸-高氯酸熔融-火焰光度法测定;碱解氮(AN)采用碱解扩散法测定;有效磷(AP)采用 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾(AK)采用 NH₄Ac

浸提-火焰光度法测定。

1.3 数据处理

使用 Excel 2007 和 SPSS 20.0 对土壤养分数据进行处理和统计分析,统计数值为 0~10 cm 与 10~20 cm 两层土壤的均值。利用单因素方差分析(One-way ANOVA, LSD)对不同位置的养分指标进行差异显著性检验,利用独立样本 T 检验对不同地类养分指标的差异进行显著性检验。

利用层次分析法(AHP)对土壤养分指标(有机质、全量、速效量)逐层进行权重分析,并用 Matlab 进行计算;通过一致性检验后,利用物元分析模型对每个评价指标进行分级,确定经典域和节域;通过关联函

数分别计算各指标的土壤养分等级,最终使用物元分析模型集成得到多指标的综合土壤养分水平^[11-13]。

2 结果与分析

2.1 土壤养分指标的描述性统计

研究区土壤养分各指标均值如表 2 所示。根据全国第二次土壤普查土壤养分分级标准^[14],研究区内土壤碱解氮属于 4~5 级水平,有效磷属于 4 级水平,速效钾属于 1~3 级水平。土壤全磷、全钾在不同地类有所差异:有林地全磷属于 5 级水平,全钾属于 1~2 级水平;无林地全磷属于 4~5 级水平,全钾属于 1 级水平。此外,土壤有机质、全氮在不同地类条件下

表 2 研究区土壤养分的最大值、最小值、均值及变异系数

Table 2 Maximum, minimum and mean contents, coefficients of variation of soil nutrients in study area

养分指标	统计指标	有林地			无林地		
		<0.5 km	0.5~1.0 km	1.0~1.5 km	<0.5 km	0.5~1.0 km	1.0~1.5 km
有机质 (g/kg)	最大值	44.50	51.20	52.60	14.50	21.40	14.10
	最小值	18.40	14.70	22.80	4.40	5.90	11.20
	均值±标准差	27.30 ± 1.12 a	29.50 ± 0.97 a	35.00 ± 1.12 a	8.80 ± 0.40 a	11.30 ± 0.43 a	13.10 ± 0.46 a
	变异系数	0.41	0.33	0.32	0.45	0.38	0.35
全氮 (g/kg)	最大值	3.07	3.66	3.66	1.19	1.43	1.00
	最小值	1.29	1.06	1.64	0.31	0.41	0.79
	均值±标准差	1.99 ± 0.82 a	2.10 ± 0.67 a	2.47 ± 0.74 a	0.68 ± 0.33 a	0.78 ± 0.34 a	0.91 ± 0.35 a
	变异系数	0.41	0.32	0.30	0.49	0.43	0.39
全磷 (g/kg)	最大值	0.9	0.79	0.79	0.88	0.85	0.76
	最小值	0.51	0.37	0.42	0.62	0.48	0.55
	均值±标准差	0.66 ± 0.14 a	0.60 ± 0.12 a	0.58 ± 0.10 a	0.75 ± 0.17 a	0.66 ± 0.09 a	0.66 ± 0.09 a
	变异系数	0.23	0.20	0.18	0.21	0.14	0.13
全钾 (g/kg)	最大值	34.06	38.19	38.53	33.22	34.57	36.66
	最小值	18.73	25.54	27.73	28.84	30.27	29.31
	均值±标准差	28.20 ± 4.23 b	31.49 ± 3.78 ab	32.91 ± 3.95 a	31.23 ± 3.44 a	32.73 ± 1.64 a	33.00 ± 1.32 a
	变异系数	0.15	0.12	0.12	0.11	0.05	0.04
碱解氮 (mg/kg)	最大值	147.00	108.50	126.00	63.00	69.00	105.00
	最小值	21.00	17.50	56.00	8.50	13.00	40.50
	均值±标准差	54.93 ± 36.80 b	62.88 ± 30.81 ab	89.25 ± 32.13 a	33.63 ± 20.85 a	42.29 ± 18.18 a	60.88 ± 20.70 a
	变异系数	0.67	0.49	0.36	0.62	0.43	0.34
有效磷 (mg/kg)	最大值	12.00	10.60	10.60	8.40	8.80	9.30
	最小值	3.00	2.95	4.20	5.90	5.30	6.70
	均值±标准差	7.22 ± 3.10 a	6.53 ± 2.29 a	5.64 ± 1.18 a	7.25 ± 1.31 a	7.32 ± 1.10 a	8.10 ± 1.05 a
	变异系数	0.43	0.35	0.21	0.18	0.15	0.13
速效钾 (mg/kg)	最大值	253.75	301.00	473.50	156.00	316.50	438.00
	最小值	26.25	32.00	63.00	116.25	103.50	99.25
	均值±标准差	117.87 ± 93.12 b	126.81 ± 69.75 b	220.75 ± 117.00 a	135.94 ± 82.92 a	181.68 ± 74.49 a	258.81 ± 98.35 a
	变异系数	0.79	0.55	0.53	0.61	0.41	0.38

注:同行数据后不同小写字母表示同一土地利用下距黄河故道不同距离间差异在 $P < 0.05$ 水平显著。

差异较大:有林地土壤有机质属于 2~3 级水平,全氮属于 1~2 级水平;无林地土壤有机质、全氮均属于 4~5 级水平,明显低于有林地。

从变异系数看,有林地土壤养分变异系数介于 0.12~0.67,无林地土壤养分变异系数介于 0.04~0.62。其中,土壤速效钾变异程度最大,离散程度高,碱解氮变异程度次之,全钾变异程度最小。随远离黄河故道河堤,有林地和无林地的变异系数整体上呈减小趋势,说明各土壤养分指标差异变小,呈均一化分布。

2.2 土壤养分空间变异特征

2.2.1 土壤有机质 研究区有林地土壤有机质平均含量介于 27.30~35.00 g/kg,无林地土壤有机质平均含量介于 8.80~13.10 g/kg。随着远离黄河故道河堤,土壤有机质含量均呈增加趋势。此外,有林地土壤有机质含量始终高于无林地($P<0.05$),显然农田防护林种植使林下土壤生态环境得到改善,进而增加了土壤有机质含量。

从变异系数看,有林地土壤有机质变异系数介于 0.32~0.41,略低于无林地(0.35~0.45),属于中等程度变异。随着远离河堤,有林地和无林地的土壤养分变异系数逐渐减小,有机质含量朝均匀化方向发展。

2.2.2 土壤全量养分 研究区有林地土壤全氮平均含量介于 1.99~2.47 g/kg,无林地土壤全氮平均含量介于 0.68~0.91 g/kg。随着远离河堤,土壤全氮变化趋势与有机质一致,呈增加趋势。有林地土壤全磷平均含量介于 0.58~0.66 g/kg,无林地全磷平均含量介于 0.66~0.75 g/kg,并随远离河堤基本呈减少趋势。有林地土壤全钾平均含量介于 28.20~32.91 g/kg,无林地全钾平均含量介于 31.23~33.00 g/kg,并随远离河堤呈增加趋势,且有林地全钾含量在距黄河故道<0.5 km 和 1.0~1.5 km 区域差异性显著($P<0.05$)。此外,有林地土壤全氮含量始终高于无林地($P<0.05$),而全磷、全钾含量始终低于无林地($P>0.05$),这可能是由于农田防护林中枯落物分解、根系分泌代谢等因

素增加了土壤腐殖质,提高了全氮含量。

从变异系数看,有林地土壤全氮变异系数介于 0.30~0.41,略低于无林地(0.39~0.49),而土壤全磷、全钾变异系数分别为 0.18~0.23、0.12~0.15,略高于无林地。随着远离河堤,有林地和无林地的土壤养分变异系数均呈减小趋势,各全量养分分布趋于均一。

2.2.3 土壤速效养分 研究区有林地土壤碱解氮平均含量介于 54.93~89.25 mg/kg,无林地土壤碱解氮平均含量介于 33.63~60.88 mg/kg。随着远离河堤,土壤碱解氮含量均呈增加趋势,且有林地碱解氮含量在距黄河故道<0.5 km 和 1.0~1.5 km 区域差异性显著($P<0.05$)。有林地土壤有效磷平均含量介于 5.64~7.22 mg/kg,无林地土壤有效磷平均含量介于 7.25~8.10 mg/kg。随着远离河堤,有林地土壤有效磷含量减小,无林地土壤有效磷含量增加。有林地土壤速效钾平均含量为 117.87~220.75 mg/kg,无林地土壤速效钾平均含量为 135.94~258.81 mg/kg,并随远离河堤呈增加趋势,且有林地速效钾在距黄河故道<0.5、0.5~1.0 km 区域均与 1.0~1.5 km 区域呈显著差异($P<0.05$)。此外,有林地土壤碱解氮含量均高于无林地($P>0.05$),有效磷、速效钾含量均低于无林地($P>0.05$),表明农田防护林生长对速效养分含量影响不大。

从变异系数看,有林地土壤碱解氮、有效磷和速效钾的变异系数分别在 0.36~0.67、0.21~0.43、0.53~0.79,均高于无林地。随着远离河堤,有林地和无林地的土壤速效养分变异系数均呈减小趋势,速效养分含量分布趋于均一。

2.3 土壤养分综合评价

2.3.1 建立层次结构模型 本研究利用层次分析法(AHP)构造土壤养分结构模型(图 1)。其中,土壤养分 A 为目标层,土壤有机量 B1、土壤全量 B2、土壤有效量 B3 作为 3 个准则层,根据递增层次结构,指标层包括:有机质 P1、全氮 P2、全磷 P3、全钾 P4、碱解氮 P5、有效磷 P6、速效钾 P7^[15-17]。

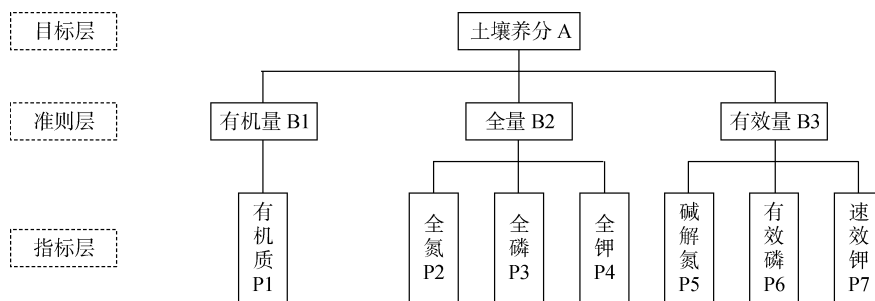


图 1 层次结构模型

Fig.1 Hierarchical structure model

2.3.2 指标权重确定 如图 1 所示,结构图中各指标的重要程度采用 9 标度的方法进行打分,并构建相应的判断矩阵。准则层中的重要度排序为: B1>B2>B3。利用两两比较的方法,结合 9 标度含义对其进行赋值,再利用方根法求出重要度,构造出准则层中三因素对于目标层的相对重要度。准则层的构造判断矩阵如表 3 所示。

表 3 A-B 判断矩阵
Table 3 A-B judgment matrix

土壤养分 A	有机量 B1	全量 B2	速效量 B3	权重
有机量 B1	1	2	3	0.548
全量 B2	1/2	1	5/4	0.258
速效量 B3	1/3	4/5	1	0.194

利用 Matlab 计算判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}=3.004$, 计算出一致性指标 $I_c=0.002$, 查表得出平均随机性指标 $IR=0.520$, 则随机一致性比率 $R_c=I_c/IR=0.004<0.1$, 表明结果通过一致性检验, 具有满意一致性。

指标层判断矩阵构造采取同样方式, 不同评价因子所占权重如表 4 所示。其中, B1-P 矩阵中的指标层只有有机质一个指标, 故该矩阵指标层的权重与准则层一致, 为 0.548; B2-P 矩阵和 B3-P 矩阵一致, $\lambda_{\max}=3.012$, 计算出一致性指标 $I_c=0.006$, 查表得出平均随机性指标 $IR=0.520$, 则随机一致性比率 $R_c=I_c/IR=0.011<0.1$, 表示结果通过一致性检验, 具有满意一致性。因此, 各影响因素的相对重要度是可取的。

表 4 土壤养分评价因子权重
Table 4 Weights of soil nutrient evaluation factors

目标层	准则层	指标层	权重
土壤养分 A	有机量 B1	有机质 P1	0.548
		全氮 P2	0.098
	全量 B2	全磷 P3	0.082
		全钾 P4	0.078
		有效量 B3	碱解氮 P5
	有效量 B3	有效磷 P6	0.062
		速效钾 P7	0.059

2.3.3 经典域、节域和待判物元的确定 $R=(N, c, v)$ 是描述事物 N 的基本元(物元)。其中, c_1, c_2, \dots, c_n 分别代表事物 N 的 n 个特征, v_1, v_2, \dots, v_n 分别代表相应的量值, 而 a_1, b_1 分别表示量值范围的最小

值和最大值, 具体表示如下:

$$R = \begin{bmatrix} N, & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \dots & \dots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N, & c_1 & \langle a_1, b_1 \rangle \\ & c_2 & \langle a_2, b_2 \rangle \\ & \dots & \dots \\ & c_n & \langle a_n, b_n \rangle \end{bmatrix} \quad (1)$$

依据可拓集合概念^[17], 将土壤养分丰富、较丰富、适量、贫乏、极贫乏等 5 个等级的定性描述转变为 N_1, N_2, N_3, N_4, N_5 等形式的定量描述。其中 N_1 =丰富、 N_2 =较丰富、 N_3 =适量、 N_4 =贫乏、 N_5 =极贫乏。采用全国第二次土壤普查土壤养分的分级标准^[14], 建立土壤养分评价的 5 个经典域物元($R_1 \sim R_5$)和 1 个节域物元(R_p):

$$R_1 = \begin{bmatrix} N, & c_1 & \langle 30, 40 \rangle \\ & c_2 & \langle 1.5, 2.5 \rangle \\ & c_3 & \langle 1.5, 2.0 \rangle \\ & c_4 & \langle 20, 35 \rangle \\ & c_5 & \langle 120, 150 \rangle \\ & c_6 & \langle 20, 40 \rangle \\ & c_7 & \langle 150, 260 \rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} N_2, & c_1 & \langle 20, 30 \rangle \\ & c_2 & \langle 1.0, 1.5 \rangle \\ & c_3 & \langle 1.0, 1.5 \rangle \\ & c_4 & \langle 15, 20 \rangle \\ & c_5 & \langle 90, 120 \rangle \\ & c_6 & \langle 10, 20 \rangle \\ & c_7 & \langle 100, 150 \rangle \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} N_3, & c_1 & \langle 10, 20 \rangle \\ & c_2 & \langle 0.75, 1.0 \rangle \\ & c_3 & \langle 0.7, 1.0 \rangle \\ & c_4 & \langle 10, 15 \rangle \\ & c_5 & \langle 60, 90 \rangle \\ & c_6 & \langle 5, 10 \rangle \\ & c_7 & \langle 50, 100 \rangle \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} N_4, & c_1 & \langle 6, 10 \rangle \\ & c_2 & \langle 0.5, 0.75 \rangle \\ & c_3 & \langle 0.4, 0.7 \rangle \\ & c_4 & \langle 5, 10 \rangle \\ & c_5 & \langle 30, 60 \rangle \\ & c_6 & \langle 3, 5 \rangle \\ & c_7 & \langle 30, 50 \rangle \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$R_5 = \begin{bmatrix} N_5, c_1 & \langle 0, 6 \rangle \\ c_2 & \langle 0, 0.5 \rangle \\ c_3 & \langle 0, 0.4 \rangle \\ c_4 & \langle 0, 5 \rangle \\ c_5 & \langle 0, 30 \rangle \\ c_6 & \langle 0, 3 \rangle \\ c_7 & \langle 0, 30 \rangle \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$R_p = \begin{bmatrix} N_p, c_1 & \langle 0, 40 \rangle \\ c_2 & \langle 0, 2.5 \rangle \\ c_3 & \langle 0, 2.0 \rangle \\ c_4 & \langle 0, 35 \rangle \\ c_5 & \langle 0, 150 \rangle \\ c_6 & \langle 0, 40 \rangle \\ c_7 & \langle 0, 260 \rangle \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中： $c_1 \sim c_7$ 分别对应 7 项评价指标 P1 ~ P7。由于研究区全氮、全钾、速效钾的数据有部分超出经典域范围，对应的量值范围(v_2, v_4, v_7)需进行相应调整^[18]，即利用测定数据最大值代替经典域范围的最大值。

以距黄河故道 <0.5 km 内有林地为例，该范围内土壤养分指标均值分别为：土壤有机质 27.3 g/kg、全氮 1.99 g/kg、全磷 0.66 g/kg、全钾 28.20 g/kg、碱解氮 54.93 mg/kg、有效磷 7.22 mg/kg、速效钾 117.87 mg/kg，以此数据确定该点 S1 的待判物元：

$$R_{S1} = \begin{bmatrix} N_{S1}, c_1 & 27.3 \\ c_2 & 1.99 \\ c_3 & 0.66 \\ c_4 & 28.20 \\ c_5 & 54.93 \\ c_6 & 7.22 \\ c_7 & 117.87 \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.3.4 计算关联度与确定质量等级 将待判物元

代入关联度公式，以单指标 c_1 (有机质) 为例， $v_1=27.3$ ，可得到该指标对应的各评价等级关联度分别为 $K_1(v_1)=-0.18$ ， $K_2(v_1)=0.27$ ， $K_3(v_1)=-0.37$ ， $K_4(v_1)=-0.58$ ， $K_5(v_1)=-0.63$ ，依据判断标准， $K_2(v_1)=\max K_j(v_1)$ ，判定该指标的土壤养分级别属于 N_2 ，即适量级别。

用同样方法，可以求出 S1 其他各项指标对应各等级的关联度及其养分级别。在此基础上，通过加权求和，计算所有指标对应各评价等级的综合关联度分别为 $K_1(P_{S1})=-0.22$ ， $K_2(P_{S1})=-0.07$ ， $K_3(P_{S1})=-0.36$ ， $K_4(P_{S1})=-0.50$ ， $K_5(P_{S1})=-0.61$ 。依据判断标准， $K_2(P_{S1})=\max K_j(P_{S1})$ ，判定样地 S1 的土壤养分级别属于 N_2 ，即较丰富。采用同样步骤，对其余样地土壤养分水平进行相应计算，并判定土壤养分级别(表 5)。根据表 5，距黄河故道 <0.5 km 区域内无林地土壤养分等级属于贫乏等级，而该区域内有林地土壤养分等级属于较丰富等级；距黄河故道 0.5 ~ 1.0 km 和 1.0 ~ 1.5 km 区域内，无林地土壤养分等级均为适量等级，而有林地土壤养分等级均为丰富等级。

3 讨论

3.1 土壤养分变化特征

黄河故道长期受黄河泛滥影响，形成河岸高、两侧低的缓坡地势。在距黄河故道<0.5、0.5 ~ 1.0、1.0 ~ 1.5 km 等 3 个区域内，土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷(无林地)、全钾、速效钾等养分含量呈增加趋势，土壤全磷、有效磷(有林地)含量呈减少趋势。其原因可能是在距黄河故道<0.5 km 范围内土壤颗粒较粗、质地松散，进而造成有机质、氮素、钾素等养分含量较低；而全磷向河流一侧输移在距黄河故道<0.5 km 范围内富集^[19]。这与王洪杰等^[20]研究结果基本一致，土壤有机质、全氮、碱解氮与砂粒含量呈极显著负相关，土壤全磷与砂粒含量呈极显著正相关。

表 5 土壤养分综合评价指标的相关计算结果

Table 5 Calculated correlation of comprehensive evaluation indexes of soil nutrients

评价等级	有林地			无林地		
	<0.5 km	0.5 ~ 1.0 km	1.0 ~ 1.5 km	<0.5 km	0.5 ~ 1.0 km	1.0 ~ 1.5 km
N_1	-0.22	-0.10	0.22	-0.61	-0.52	-0.51
N_2	-0.07	-0.14	-0.54	-0.46	-0.43	-0.39
N_3	-0.36	-0.39	-0.63	-0.14	-0.05	-0.01
N_4	-0.50	-0.51	-0.67	0.08	-0.15	-0.27
N_5	-0.61	-0.62	-0.76	-0.30	-0.37	-0.37
养分级别	较丰富 II	丰富 I	丰富 I	贫乏 IV	适量 III	适量 III

本研究中,有林地土壤碱解氮、全钾含量均在距黄河故道<0.5 km 和 1.0 ~ 1.5 km 区域之间差异性显著($P<0.05$),速效钾含量在距黄河故道<0.5、0.5 ~ 1.0 与 1.0 ~ 1.5 km 区域之间差异显著($P<0.05$),说明黄河故道对土壤碱解氮、全钾等的直接影响范围在 0.5 km 以内,而对土壤速效钾的影响范围在 1.0 km 左右。其原因可能是在距黄河故道<0.5 km 范围内地势坡度较大,径流流速快,土壤黏粒含量少,进而造成土壤养分较低^[21];随着远离河堤,土壤黏粒增加,保持土壤养分的能力增加,因此,以上养分含量在<0.5 km 和 1.0 ~ 1.5 km 之间差异明显。

综合来看,有林地土壤碱解氮、全钾、速效钾等养分受位置因素影响显著。这与赵越等^[22]研究基本一致,即样地位置不同导致成土母质等各种条件不同,这些条件通过影响土壤物理化学组成和风化淋溶进程影响养分含量。

3.2 土壤养分等级

根据全国第二次土壤普查土壤养分分级标准^[14],在距黄河故道<0.5、0.5 ~ 1.0、1.0 ~ 1.5 km 3 个区域内,有林地土壤有机质(2 ~ 3 级)、全氮(1 ~ 2 级)所处养分级别显著高于无林地,这与闫丽娟等^[23]研究基本一致,其原因可能是杨树充分发挥其高生产力、深根性等特性,分泌更多代谢物质进入土壤,从而促进土壤碳氮的积累。此外,余婷等^[24]指出,凋落物能够促进森林生态系统碳素和养分循环,是土壤有机质的重要来源。车宗玺等^[25]指出,土壤氮素是成土过程中在生物作用下积累的,主要取决于有机质积累和分解作用的相对强度。本研究中,农田防护林长势良好,凋落物丰富,再加上根系对土壤碳氮的影响,因此有林地土壤有机质、全氮积累较多。

在距黄河故道<0.5、0.5 ~ 1.0、1.0 ~ 1.5 km 3 个区域内,有林地土壤全磷(5 级)、全钾(1 ~ 2 级)、碱解氮(4 ~ 5 级)、有效磷(4 级)、速效钾(1 ~ 3 级)所处养分级别与无林地基本一致,说明以上 5 个指标含量受农田防护林影响较小。对比发现,研究区土壤全钾、速效钾含量级别较高,其原因可能是土壤钾元素继承黄河故道成土母岩特性造成的。研究区土壤类型主要为潮土,潮土中富含水云母等含钾矿物^[26],因此土壤含钾丰富。

综合来看,无林地土壤养分等级属于 III ~ IV 级,有林地土壤养分等级属于 I ~ II 级。这与岳庆玲^[27]研究相似,即农田防护林生长过程中,充分发挥根系的生态作用以及凋落物的腐解作用,既增加土壤结构稳定性又增加了养分,提高了土壤肥力,促进了农田

防护林的生长。

4 结论

盐城市阜宁县和淮安市涟水县的黄河故道区域内,有林地土壤碱解氮、全钾、速效钾等含量受位置因素影响显著;与无林地相比,农田防护林能有效促进土壤有机质、全氮积累,但对磷素、钾素影响不大。在农田防护林管理中,应采取综合措施进行调节,对与之配置的经济树种,一方面适量施用磷肥,以补充土壤养分不足;另一方面注重施肥方式,与氮等科学配施,提高磷肥利用率。

参考文献:

- [1] 张彬, 杨联安, 杨粉莉, 等. 基于投影寻踪的土壤养分综合评价及影响因素研究[J]. 土壤, 2020, 52(6): 1239-1247.
- [2] Matias L, Castro J, Zamora R. Soil-nutrient availability under a global-change scenario in a Mediterranean Mountain ecosystem[J]. Global Change Biology, 2011, 17(4): 1646-1657.
- [3] Ezui K S, Franke A C, Ahiabor B D K, et al. Understanding cassava yield response to soil and fertilizer nutrient supply in West Africa[J]. Plant and Soil, 2017, 420(1): 331-347.
- [4] 赵义博, 雷少刚, 刘英. 胜利矿区土壤养分空间变异特征与影响因素[J]. 土壤, 2020, 52(2): 356-364.
- [5] 李有芳, 张超博, 易晓瞳, 等. 云南玉溪柑橘园土壤养分状况与分布特征[J]. 土壤, 2020, 52(3): 487-493.
- [6] 董彩霞, 谢昶琰, 李红旭, 等. 黄河流域主要梨园土壤养分丰缺状况[J]. 土壤, 2021, 53(1): 88-96.
- [7] 宋晓杰. 淮安市黄河故道综合开发规划整体思路研究[J]. 改革与开放, 2017(21): 42-43, 53.
- [8] 高金梅, 何敏, 石炜, 等. 淮安市黄河故道规模化发展节水灌溉的实践与思考[J]. 中国水利, 2014(19): 43-44.
- [9] 王灿. 黄河故道农田防护林立地分类与评价研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2019.
- [10] 程涉. 黄河故道杨树农田防护林带立地类型与生长规律研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2020.
- [11] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
- [12] Li B, Yang G S, Wan R R, et al. Dynamic water quality evaluation based on fuzzy matter-element model and functional data analysis, a case study in Poyang Lake[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2017, 24(23): 19138-19148.
- [13] 赵串串, 安若兰, 赵巧玉, 等. 物元模型在玉树地区林地土壤养分评价中的应用[J]. 土壤, 2014, 46(6): 984-988.
- [14] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [15] 卢丽丽, 吴根义. 基于层次分析法的稻田氨排放影响因素权重分析[J]. 湖南农业科学, 2021(7): 48-52.
- [16] 荣艳芳. 基于层次分析法确定林区土壤养分的权重[J]. 防护林科技, 2018(9): 23-24, 28.

- [17] Jia C, Zhang Y W, Han J M, et al. Susceptibility area regionalization of land subsidence based on extenics theory[J]. *Cluster Computing*, 2017, 20(1): 53–66.
- [18] 王晶, 董起广, 张露, 等. 黄土丘陵沟壑区沟道造地土壤养分变化特征及评价[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(6): 64–70, 77.
- [19] 钱进, 沈蒙蒙, 王沛芳, 等. 河岸带土壤磷素空间分布及其对水文过程响应[J]. *水科学进展*, 2017, 28(1): 41–48.
- [20] 王洪杰, 李宪文, 史学正, 等. 不同土地利用方式下土壤养分的分布及其与土壤颗粒组成关系[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(2): 44–46, 50.
- [21] 郭二辉, 云菲, 冯志培, 等. 河岸带不同植被格局对表层土壤养分分布和迁移特征的影响[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(7): 1164–1172.
- [22] 赵越, 罗志军, 廖牧鑫, 等. 泰和县耕地土壤养分空间分布及影响因素[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 296–303.
- [23] 闫丽娟, 王海燕, 李广, 等. 黄土丘陵区 4 种典型植被对土壤养分及酶活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 190–196, 204.
- [24] 余婷, 田野. 森林生态系统凋落物多样性对分解过程和土壤微生物特性影响研究进展[J]. *生态科学*, 2020, 39(1): 213–223.
- [25] 车宗玺, 刘贤德, 车宗奇, 等. 祁连山青海云杉林土壤有机质及氮素的空间分布特征[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(5): 164–169.
- [26] 席承藩. *土壤分类学*[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994.
- [27] 岳庆玲. 黄土丘陵沟壑区植被恢复重建过程土壤效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.