

黄土丘陵沟壑区沟道造地土壤养分变化特征及评价

王晶^{1,2}, 董起广², 张露², 白清俊¹

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省土地工程建设集团有限责任公司 陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司 自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室 陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安 710075)

摘要: [目的] 研究黄土丘陵沟壑区沟道造地工程后沟道土壤养分的变化特征, 为该区改进土地整治方法, 采取合理耕种管理措施及提高养分资源利用率提供科学依据。[方法] 以陕西省延安市典型沟道造地项目区土壤为研究对象, 采用统计分析方法, 分别对项目区整治前、整治后 2, 3, 6 a 土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾 4 个指标的变化特征进行分析, 并采用物元模型对其进行综合评价。[结果] ①除速效钾外, 研究区土壤养分含量普遍较低; 沟道中土壤养分变异程度较大, 属中等变异程度, 土地整治后, 沟道中各种养分变异系数有变小的趋势。②沟道土地整治后 6 a 时间内, 随工程实施年限的增加, 土壤有机质含量呈现先减少后增加的趋势, 6 a 时含量低于整治前; 土壤全氮和有效磷含量呈现先增加后减少的趋势, 6 a 时高于整治前; 土壤速效钾含量持续降低。③沟道土地整治后 3 a, 土壤养分评价等级恢复到整治前水平, 且有继续提高的潜力。[结论] 与坡面土地整治相比, 黄土丘陵沟壑区沟道造地土壤养分恢复时间更短, 可根据沟道不同位置土壤养分变异特征, 调整沟道作物空间布局, 实施不同程度和方法的管理措施, 增加粮食产量。

关键词: 沟道造地; 土壤养分; 整治年限; 物元模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)06-0064-07

中图分类号: S153.6

文献参数: 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.06.010; Wang Jing, Dong Qiguang, Zhang Lu, et al. Change characteristics and evaluation of soil nutrient of gully cultivated land in loess hilly and gully region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6): 64-70.

Change Characteristics and Evaluation of Soil Nutrient of Gully Cultivated Land in Loess Hilly and Gully Region

Wang Jing^{1,2}, Dong Qiguang², Zhang Lu², Bai Qingjun¹

(1. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co. Ltd., Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, the Ministry of Natural and Resources, Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Xi'an, Shaanxi 710075, China)

Abstract: [Objective] The characteristics of soil nutrient changes after gully control and land consolidation were investigated in order to improve the land consolidation methods, take the proper cultivation management measures and increase the nutrient utilization efficiency of the loess hilly and gully region. [Methods] Taking the typical land-consolidation project in Yan'an City, Shaanxi Province as the research object, soil samples at different locations of the gullies before and at 2, 3 a and 6 a after the consolidation were collected, and the change characteristics of soil organic matter, total nitrogen, available phosphorus and available potassium were analyzed based on the statistical analysis method. The comprehensive evaluation of soil nutrients was performed by matter-element model. [Results] ① The soil nutrient level in the study area was generally low, except for the available potassium. The variation of soil nutrients in the gully was relatively large,

收稿日期: 2020-08-01

修回日期: 2020-09-01

资助项目: 国家重点研发计划项目“沟道及坡面治理工程的生态安全保障技术集成与综合示范”(2017YFC0504705)

第一作者: 王晶(1987—), 女(汉族), 陕西省西安市人, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事土地工程及农业水土工程研究。Email: wangjing0722@126.com。

通讯作者: 白清俊(1967—), 男(汉族), 陕西省渭南市人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土工程与节水灌溉技术研究。Email: 445920785@qq.com。

belonging to moderate degree of variation. After the land consolidation, the variation coefficient of soil nutrients tended to decrease. ② Soil organic matter content decreased at first and then increased with the increase of project implementation within 6 years after the gully consolidation, and the content of soil organic carbon was lower than that before consolidation. Soil total nitrogen and available phosphorus increased at first and then decreased, which was higher than those before years. Soil available potassium decreased continuously after consolidation. ③ Three years after the land consolidation, the soil nutrient evaluation level in the study area returned to the level before remediation, and had the potential to continue to improve. [Conclusion] Compared with slope land consolidation, soil nutrients could recover faster following the gully land consolidation in the loess hilly and gully region. According to the variation characteristics of soil nutrients in different locations, the grain yield could be increased through adjusting the spatial layout of crops and implementing different management strategies.

Keywords: gully control and land consolidation; soil nutrients; consolidation years; matter-element model

黄土高原是中国水土流失最严重与生态环境最脆弱的地区,同时承担着重要的农业生产任务。这一地区曾因开垦农地使生态环境遭到严重破坏^[1],虽然退耕还林还草工程的大规模实施极大改善了区域生态环境,但也导致耕地面积减少,出现可利用耕地紧张,粮食供需不平衡的局面^[2-3]。为解决局部人—粮矛盾等突出问题,延安市治沟造地项目从 2010 年开始试点,2013 年被列为中央支持的国家土地整治重大工程项目^[4]。治沟造地工程针对黄土丘陵沟壑区特殊地貌,通过闸沟造地、打坝修渠、垫沟覆土等措施,旨在增加区域耕地面积,提高耕地质量,保证粮食安全、解决人地矛盾^[5]。截至 2018 年底,已完成治沟造地 33 973.33 hm²,新增耕地 6 860 hm²^[6]。

土壤养分是构成土壤肥力的物质基础,其时空分布特征对土壤环境质量和作物健康状况都有着重要的影响^[7]。土地整治措施例如机械碾压、土壤深翻、表土剥离以及回填,打破了土壤的原始状态,可能对土壤的有机质及速效养分含量产生一定的影响。研究发现,经过土地整治,土壤肥力在一段时间内呈现下降趋势,土壤氮、磷、钾等养分和有机质含量减少,微量元素降低^[8-11]。自开展治沟造地工程以来,我国学者对黄土高原地区沟道土壤质量和养分的变化进行了一些研究。王鹏等^[12]以 13 个治沟造地项目为研究对象,分析评价了治沟造地新增耕地的土壤养分特征,表明治沟造地形成的新增耕地质量等级低,由于利用时间短,造成有机质、速效钾和有效磷含量低;付威等^[13]研究表明合适的培肥可快速提高治沟造地新构造土地的土壤有机质,改善耕层土壤物理及化学性质,提升土地生产力;陈淑梅等^[14]从陕北不同沟道土地盐碱化的研究中发现,治沟造地的土层较薄,加之水库或淤地坝的阻挡作用,使得地下水位较浅,土壤易发生盐碱化。然而,目前在沟道土地整治后较长时间尺度上土壤养分的变化还未见深入研究。因此,

本文以陕西省延安市宝塔区南泥湾镇九龙泉土地整治项目为例,对不同整治年限沟道不同位置的土壤样品进行采集,研究整治前以及整治后不同年限土壤有机质、氮、磷、钾指标的变化特征,为这一地区改进土地整治方法,采取合理耕种管理措施,提高养分资源利用率提供有效建议;并通过物元模型对治沟造地工程前后土壤养分进行综合评价,为治沟造地项目效益评价提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

延安市宝塔区位于北纬 36°11′—37°02′,东经 109°14′—110°07′,南北长 96 km,东西宽 76 km。属半湿润半干旱大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,降水较少;夏季炎热多雨,降雨集中,多年平均降水量为 562.1 mm,降水量年内分配不均,6—9 月平均降水量占全年降水量的 70%左右。全年平均气温 9℃,平均无霜期 179 d。宝塔区位于黄土高原中部,属于黄土丘陵沟壑区,土壤类型为黄绵土。区内地形破碎,沟壑纵横,冲沟下切强烈,地形坡度较大,水土流失严重。

宝塔区南泥湾镇治沟造地项目是延安市治沟造地整治示范工程和样板工程。本文选取九龙泉典型治沟造地项目区作为研究对象。九龙泉沟地处汾川河流域,位于宝塔区南部的梁峁丘陵沟壑区,属河谷川、台地貌,西南—东北走向,沟道长约 9.5 km,河道海拔自北向南由 1 170 m 降至 1 093 m,平均比降 0.78%,河谷宽一般在 250~500 m 之间,面积为 397.35 hm²。沟道土地多开垦为农田,种植前为旱地,农作物一年一熟,水资源比较匮乏,无灌溉条件,粮食单产水平偏低,春玉米产量约 3 750~5 700 kg/hm²。治沟造地工程于 2013 年初开工建设,建设规模

360.91 hm²,总投资 4 411.65 万元。通过治沟造地工程措施,完成土地平整,建立灌溉排水、道路桥涵、生态防护工程。该区主体工程于 2014 年初竣工,并于当年开始耕种,种植作物主要为玉米,每年于 4 月底至 5 月初播种,10 月收获,产量提高到约 7 500 kg/hm²。种植年限内,施用复合肥,肥料作为基肥在播种时同时施入,尽量保证撒施均匀,同时在拔节期追施氮肥,施肥量与施肥方式与整治前相同,玉米收获后秸秆部分粉碎还田,冬季休耕,其他耕作措施与当地传统耕作方式相同。

1.2 土壤样品的采集及测定

在九龙泉沟沟道,利用 GPS 定位,从沟头位置开始,顺沟道向沟口每隔一段距离(800~1 300 m)设置一个点,沟头、沟道中部、沟口共设置 9 个固定样点

(表 1)。于 2013 年 4 月项目开工前、2015 年 7 月、2016 年 7 月及 2019 年 6 月采样,每次按照 GPS 信息定位固定样点,再以每个固定样点为中心,根据地形地貌,在 10 m 半径内,按照“S”形随机选择 5 个土壤样点,采用直径 40 mm 的土钻采集 0—30 cm 土层的土壤样品,每个土样 1 000 g 左右,重复 3 次,同时注意在采样时避开施肥点。将采集的样点土壤充分混合均匀后,得到整治前(0 a)、整治后 2 a(2 a)、整治后 3 a(3 a)和整治后 6 a(6 a)4 个时期土壤样品。样品在实验室经风干、研磨、过筛后进行指标测定。土壤有机质采用 K₂CrO₇-H₂SO₄ 氧化法测定,全氮采用半微量凯氏定氮法测定,有效磷采用 NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法测定,速效钾采用 CH₃COONH₄ 浸提—火焰光度法测定^[15]。

表 1 采样点基本信息

采样点	位置	经纬度		海拔/ m	整治前 土壤质地
		经度	纬度		
1	沟头	109°36'47.6"	36°14'46.9"	1 170	粉壤土
2		109°37'4.2"	36°15'14.5"	1 162	粉壤土
3		109°37'22.4"	36°15'37.6"	1 159	粉壤土
4	沟道中部	109°37'47.1"	36°16'9.2"	1 145	粉壤土
5		109°38'5.7"	36°16'37.6"	1 133	粉壤土
6		109°38'17.8"	36°17'8.9"	1 128	粉壤土
7	沟口	109°38'40.5"	36°17'55.9"	1 110	粉壤土
8		109°39'12.7"	36°18'31.6"	1 102	粉壤土
9		109°39'27.9"	36°19'5.1"	1 093	粉壤土

1.3 数据处理

研究采用经典统计分析、地统计分析相结合的方法,采用 SPSS 18.0(SPSS Inc., Chicago, USA)进行统计分析,不同整治年限的差异显著性采用单因素方差分析(ONE-WAY ANOVA, LSD)检验。

1.4 物元模型评价方法

研究应用物元模型进行土壤养分评价。由于土壤养分是一个多指标体系,明确的评价标准可能会导致信息遗漏,而基于可拓理论的物元模型显示了土壤养分的过渡状态,建立起能够变动和分解的内部结构,并计算各个指标与整体的关联度,全面地反映土壤养分的内部结构与各个指标之间的关系,由此综合判断区域土壤养分的基本情况^[16-17]。物元模型分析首先对每个评价指标进行分级,定义区间和取值范围,确定经典域和节域,然后通过单个指标的关联函数计算单个指标的土壤养分等级,再通过模型集成得到多指标的综合土壤养分水平。

2 结果与分析

2.1 土壤养分指标统计分析

就土壤养分各指标均值而言,除了速效钾以外,研究区沟道内土壤养分含量普遍较低(表 2),根据全国第二次土壤普查土壤养分分级标准^[18],有机质属于 4—5 级水平,全氮属于 2—6 级水平,有效磷属于 3—6 级水平,速效钾相对较高,属于 1—3 级水平。土地整治前,沟道中土壤养分变异程度较大,变异系数介于 0.30~0.77 之间,属于中等变异程度^[19],其中有效磷变异程度最大,离散程度高,其次是全氮和有机质,速效钾变异程度最小。治沟造地工程实施后,沟道中的各养分变异系数整体上有变小的趋势,6 a 时变异系数介于 0.23~0.54 之间,土壤养分各指标含量差异变小,在沟道中的分布趋于均一。

2.2 土壤养分时空变异特征

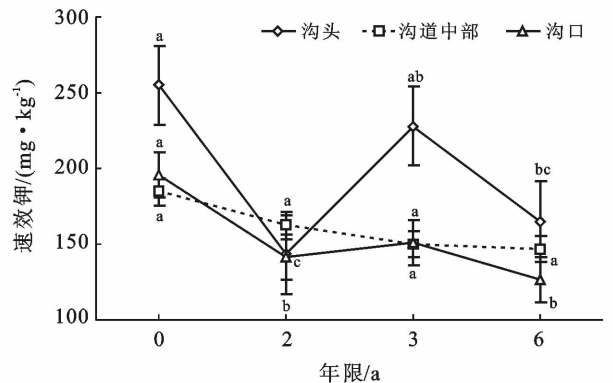
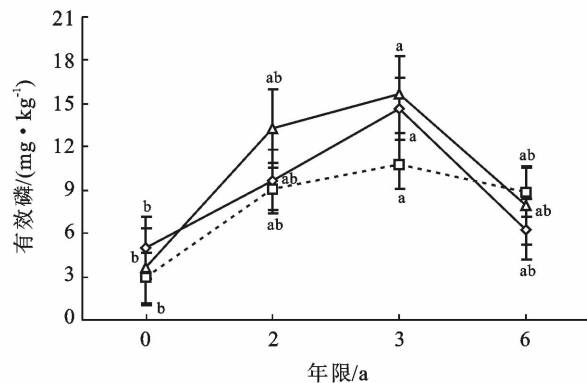
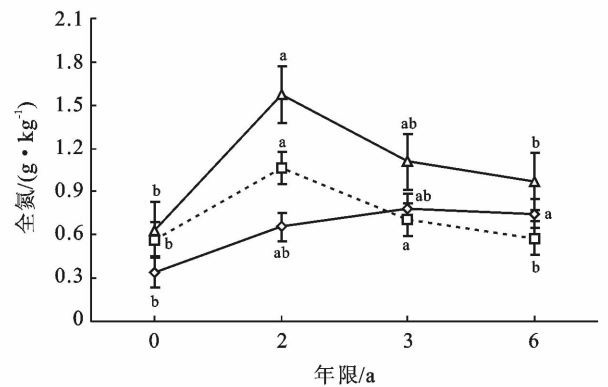
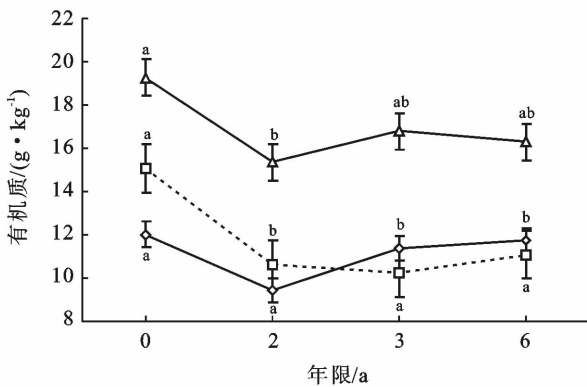
2.2.1 土壤有机质 由图 1 可以看出,整治前,九龙

泉沟沟头有机质含量为 12.02 g/kg,沟道中部稍高于沟头,沟口有机质含量最高,为 19.27 g/kg。工程实施后,沟道中的土壤有机质含量呈现出随整治年限增加而先减少后增加的趋势,但整治后 6 a 的土壤有机质含量平均值仍然低于整治前。沟头整治后 2 a 有机质含量下降为 9.44 g/kg,随着整治年限的变长有机质含量逐渐增加,6 a 时达到 11.75 g/kg,基本恢复到整治前水平,随整治年限增长的变化并不显著。沟道中部的土壤有机质含量在 2 a 显著下降,下降了 30%左右,3 a 继续下降,6 a 时稍有回升,达到 11.09 g/kg,但从 2 a 到 6 a 的变化并不显著,仍然显著低于整治前。沟口土壤有机质含量的变化与沟道中部基本一致,整治后 2 a 显著下降,2 a 以后逐渐增加,整治后 6 a 仍比整治前水平低 15.4%。从沟道不同位置整治年限的差异显著性分析可知,治沟造地工程对沟头土壤有机质含量的影响较小,有机质含量变化不明显,对沟道中部的影响更为显著。整治后,由于表土剥离的扰动或沟坡侧面贫瘠土壤的覆盖,土壤表层有机质含量低于整治前;之后,土壤生态系统经过 2~3 a 的调整,通过施肥等管理措施以及作物的自肥作用,加深了土壤的腐殖质层,使表层有机质含量增加,当整治年限增至 6 a 时,土壤系统进一步趋于稳

定,植物的生长和根系下扎也提高了下层土壤有机质的来源,促进了土壤有机质的形成,其含量进一步升高。

表 2 不同整治年限沟道土壤养分的最大值、最小值、均值及变异系数

养分指标	统计指标	沟道整治年限			
		0 a	2 a	3 a	6 a
有机质	最大值/(g·kg ⁻¹)	24.61	19.88	23.10	20.40
	最小值/(g·kg ⁻¹)	8.39	5.56	7.29	6.94
	均值/(g·kg ⁻¹)	15.40	11.63	12.48	12.77
	变异系数	0.35	0.31	0.33	0.29
全氮	最大值/(g·kg ⁻¹)	1.01	2.29	1.53	1.18
	最小值/(g·kg ⁻¹)	0.16	0.06	0.44	0.43
	均值/(g·kg ⁻¹)	0.52	1.11	0.85	0.74
	变异系数	0.45	0.68	0.29	0.29
有效磷	最大值/(mg·kg ⁻¹)	12.30	30.88	38.00	34.19
	最小值/(mg·kg ⁻¹)	1.02	4.11	1.82	2.36
	均值/(mg·kg ⁻¹)	3.73	10.53	13.25	7.86
	变异系数	0.77	0.63	0.68	0.54
速效钾	最大值/(mg·kg ⁻¹)	377	282	355	207
	最小值/(mg·kg ⁻¹)	114	84	67	83
	均值/(mg·kg ⁻¹)	206.74	151.18	191.78	146.30
	变异系数	0.30	0.29	0.38	0.23



注:不同小写字母表示不同整治年限间差异显著性($p < 0.05$)。

图 1 不同整治年限土壤养分在沟道中的分布

2.2.2 土壤全氮 整治前,全氮含量表现为:沟头<沟道中部<沟口,治沟造地工程后,沟道中的土壤全氮含量呈现出随整治年限先增加后减少的趋势,整治后所有年限的土壤全氮含量均高于未整治土壤。沟头整治后全氮含量逐渐增加,3 a 时达到最高 0.78 g/kg,随后稍有减少,3 a 及 6 a 的含量均显著高于整治前,是整治前的 2 倍以上。沟道中部的土壤全氮含量在 2 a 显著增加,随后逐渐减少,6 a 时回落到与整治前相当水平。沟口土壤全氮含量的变化趋势与沟道中部较为一致,2 a 时显著增加,随后逐渐降低,其增加的比例比沟道中部更大(图 1)。

2.2.3 土壤有效磷 同全氮含量变化趋势一致,随着整治年限变化,研究区土壤有效磷含量整体上呈现出随治理年限先增加后减少的趋势,整治后土壤有效磷含量均高于未整治土壤。沟头未整治土壤有效磷含量较低,为 5.01 mg/kg,整治后 2 a 有效磷含量逐渐上升,到 3 a 时达到最高值 14.62 mg/kg,为整治前的近 3 倍,6 a 时回落至 6.29 mg/kg,与整治前差异不显著。沟道中部和沟口的土壤有效磷含量随整治年限变化趋势与沟头一致,其中沟道中部土壤有效磷含量变化的幅度最小(图 1)。

2.2.4 土壤速效钾 整治前土壤速效钾含量表现为:沟头>沟道中部>沟口,沟头最高为 255.04 mg/kg。整治年限对速效钾的影响与氮、磷不同,从沟道中土壤速效钾含量的平均值可看出,整治后土壤中的速效钾含量基本上呈现下降的趋势。沟头土壤速效钾含量呈现了下降—回升—再下降的过程,整治后 2 a 下降较为显著,所有年限均低于整治前。沟道中部的土壤速效钾含量从整治前的 184.67 mg/kg 持续降低到整治后 6 a 的 146.93 mg/kg,整个过程变化并不显著。沟口的土壤速效钾含量的变化与沟头相似,2 a 显著下降,3 a 稍有提高,6 a 持续了下降的趋势,整治后 2 a,6 a 土壤速效钾含量均显著低于整治前(图 1)。速效钾含量与全氮、有效磷的变化规律不同,未见显著增加,这可能与流域内速效钾含量较高,农业施肥等措施影响不显著有关。

2.3 土壤养分综合评价

本文选取有机质、全氮、有效磷、速效钾 4 个指标作为评价指标,通过层次分析法确定权重^[20],并运用物元模型,对治沟造地项目土壤养分等级进行评价研究。

2.3.1 指标权重的确定 采用 AHP 法对各指标进行赋权(表 3)。其中 $\lambda_{\max}=3.98$,计算出一致性指标 $I_c=0.0026$,查表得出平均随机性指标 $IR=0.9$,则随机一致性比率 $R_c=I_c/IR=0.003<0.1$,表示结果通过一致性检验,具有满意一致性。

表 3 土壤养分评价因子权重

评价因子	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
权重系数	0.555 9	0.231 6	0.137 1	0.075 4

2.3.2 经典域、节域和待判物元的确定 依据可拓集合概念,将土壤养分分为丰富、较丰富、适量、贫乏、极贫乏 5 个等级进行分等评价,分别用罗马数字 I-V 表示。首先,拟定 N_1, N_2, N_3, N_4, N_5 这 5 个连续的数据集,分别对应 5 个评价等级。

采用全国第二次土壤普查土壤养分的分级标准^[18],建立土壤养分评价的经典域物元 R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 和节域物元 R_p 。由于速效钾数据中有部分超出经典域范围,故对应 c_4 的量值范围进行相应的变化。

$$R_1 = \begin{bmatrix} N_1 & c_1 & \langle 30, 40 \rangle \\ & c_2 & \langle 1.5, 2 \rangle \\ & c_3 & \langle 20, 40 \rangle \\ & c_4 & \langle 150, 260 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} N_2 & c_1 & \langle 20, 30 \rangle \\ & c_2 & \langle 1, 1.5 \rangle \\ & c_3 & \langle 10, 20 \rangle \\ & c_4 & \langle 100, 150 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} N_3 & c_1 & \langle 10, 20 \rangle \\ & c_2 & \langle 0.75, 1 \rangle \\ & c_3 & \langle 5, 10 \rangle \\ & c_4 & \langle 50, 100 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} N_4 & c_1 & \langle 6, 10 \rangle \\ & c_2 & \langle 0.5, 0.75 \rangle \\ & c_3 & \langle 3, 5 \rangle \\ & c_4 & \langle 30, 50 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_5 = \begin{bmatrix} N_5 & c_1 & \langle 0, 6 \rangle \\ & c_2 & \langle 0, 0.5 \rangle \\ & c_3 & \langle 0, 3 \rangle \\ & c_4 & \langle 0, 30 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_p = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & \langle 0, 40 \rangle \\ & c_2 & \langle 0, 2 \rangle \\ & c_3 & \langle 0, 40 \rangle \\ & c_4 & \langle 0, 260 \rangle \end{bmatrix}$$

确定待判物元。以整治前沟头为例,该点平均数据为:有机质 12.02 g/kg,全氮 0.34 g/kg,有效磷 5.01 mg/kg,速效钾 255.04 mg/kg,以此数据确定该点 S_1 的待判物元。

$$R_{s1} = \begin{bmatrix} N_{s1} & c_1 & 12.02 \\ & c_2 & 0.34 \\ & c_3 & 5.01 \\ & c_4 & 255.04 \end{bmatrix}$$

2.3.3 计算关联度,并确定质量等级 将待判物元带入关联度公式,以单指标 c_1 (有机质) 为例 ($v_1 = 12.02$), 可得到该指标对应的各评价等级关联度分别为 $K_1(v_1) = -0.599 2$, $K_2(v_1) = -0.398 8$, $K_3(v_1) = 0.202 4$, $K_4(v_1) = -0.144 1$, $K_5(v_1) = -0.333 8$, 依据判断标准,判定该指标的土壤养分级别属于 N_3 , 即适量级别。

用同样方法可以求出 S_1 其他各项指标对应各等级的关联度及其养分级别。根据各项指标所对应的

各等级关联度及权重,计算得出所有指标对应各评价等级的综合关联度,并依据判断标准,判定各点土壤养分级别(表4)。根据表4,治沟造地工程前,九龙泉沟沟道中土壤养分等级均属于适量等级。工程实施后2 a,沟头的土壤养分评价等级下降到贫乏级别。但通过3 a的耕种,即恢复到适量水平。沟道中部的土壤养分等级一直维持在适量水平。沟口的土壤养分评价等级在3 a时,超过整治前水平,达到较丰富等级,6 a时再次恢复到适量水平。

表4 土壤养分综合评价的相关计算结果

位置	整治年限/a	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	养分级别
沟头	0	-0.618 6	-0.515 1	-0.087 1	-0.228 3	-0.224 1	Ⅲ 适量
	2	-0.591 8	-0.449 1	-0.125 0	-0.000 6	-0.322 8	Ⅳ 贫乏
	3	-0.491 1	-0.280 4	0.012 5	-0.187 4	-0.365 4	Ⅲ 适量
	6	-0.709 7	-0.430 9	0.100 1	-0.130 1	-0.412 1	Ⅲ 适量
沟道中部	0	-0.538 4	-0.358 1	0.120 2	-0.130 1	-0.280 0	Ⅲ 适量
	2	-0.511 0	-0.251 0	-0.000 5	-0.172 7	-0.354 3	Ⅲ 适量
	3	-0.567 0	-0.328 4	-0.032 3	-0.056 3	-0.311 9	Ⅲ 适量
	6	-0.583 2	-0.358 8	0.053 4	-0.123 5	-0.295 4	Ⅲ 适量
沟口	0	-0.418 0	-0.223 1	-0.076 9	-0.078 3	-0.342 9	Ⅲ 适量
	2	-0.277 4	-0.132 4	0.090 3	-0.358 3	-0.445 7	Ⅲ 适量
	3	-0.366 2	0.020 0	0.093 2	-0.318 2	-0.412 4	Ⅱ 较丰富
	6	-0.440 9	-0.122 2	0.277 0	-0.263 2	-0.376 1	Ⅲ 适量

3 讨论

3.1 土壤养分的时间变化

目前九龙泉沟道内,除钾素外,土壤磷素、氮素和有机质均处于缺乏状态。杨静涵、郝丽婷等人在这地区土壤养分的研究中,均表明了相似结果^[21-22]。研究发现,经过整治的土地,由于表土剥离及生土覆盖等原因,土壤养分呈现下降趋势,土壤速效氮、速效磷、速效钾和土壤有机质显著减少。然而,经过一段时间的恢复(3~5 a),同时加以施用化肥等措施,土壤养分各项指标均有了明显的提高,甚至高于整治前^[23-25]。本研究中,全氮、有效磷在整治后第2,3 a就呈现出高于整治前的增长趋势,说明沟道土地整治通过合理的耕种管理措施,能较快抵消因土地整治扰动对土壤养分带来的负面影响,产生正面的影响。因为黄土高原地区土壤条件相对贫瘠,各种养分含量较低,虽然土地整治扰动对土壤养分带来了负面影响,但治沟造地工程后通过更加便利的耕作管理措施,如机器翻耕,增加了土壤孔隙,保证了耕层土壤均匀,确保降水可顺利入渗补给,且有利于养分的积累,因此施肥措施使氮磷等土壤养分含量增长较快,并在耕种一定时间后,随着作物吸收等因素,趋于稳定状态。

土壤有机质含量呈现出先减少后逐渐增加的趋势。因为有机质的形成积累是个缓慢的过程,并不能靠化学施肥迅速提升,因此直到整治后6 a,也未恢复到整治前水平。相比较速效养分,其增长具有长期性和滞后性。因此在后期耕作管理中,应采取施用有机肥、秸秆还田、种植绿肥等措施,提升土壤有机质^[26],通过优化施肥方式来保证土壤中养分的平衡,促进农业的可持续发展。速效钾的含量相对较高,可能与黄绵土中钾素含量相对较高有关,因此施肥等措施对于钾素含量的影响并不显著。

3.2 土壤养分的空间变化

因水流的运移和沉积作用,沟口通常是沟道养分的聚集区,因此沟口土壤养分含量普遍高于沟头和沟道中部,沟道内土壤养分变异程度较大,属于中等变异程度。治沟造地工程实施后,由于土地整治措施以及后期耕种管理等因素,沟道内土壤养分变异系数随整治时间有变小的趋势,土壤养分分布趋于均一,这与王瑗玲、王宏庭等的研究结果一致^[27-28]。随着整治年限继续增加,沟道不同位置的养分差异有可能因地形、水土流失等原因进一步变大。因此,可根据沟道不同位置土壤养分空间变异特征,调整沟道作物的空间布局,实施不同程度和方法的管理措施,提高养分

资源的利用率,增加粮食产量。

3.3 沟道造地优势

由于退耕还林使黄土高原耕地面积减少,引起人一地矛盾问题,已经有退耕土地进行复垦现象,但退耕地复垦使土壤理化性状迅速恶化,切不可取^[29]。沟道是流域中水养的富集地,通过适当的土地整治后十分适宜农业耕作,蕴藏着丰富的潜在耕地资源。有研究表明,黄土丘陵沟壑区沟道耕地粮食产量远远大于坡耕地,有“宁种一亩沟,不种十亩坡”的说法^[30]。本研究表明,治沟造地工程后 3 a 土壤养分评价等级就恢复到与整治前相当水平,与黄土区坡改梯工程相比,土壤养分的恢复时间更短^[31]。同时,土壤养分含量在适量水平,整治后土壤养分水平还有继续提高的潜力。因此相比较坡面,黄土丘陵沟壑区沟道更适合建造耕地,治沟造地工程能够有效缓解这一地区粮食安全与人地矛盾问题,巩固退耕还林成果。

4 结论

(1) 除速效钾外,研究区土壤养分含量普遍较低。沟道中土壤养分变异程度较大,变异系数介于 0.30~0.77 之间,属中等变异程度,其中有效磷最大,其次是全氮、有机质,速效钾变异程度最小。治沟造地工程后,沟道中土壤养分变异系数有变小的趋势,土壤养分分布朝均一化方向发展。

(2) 沟道土地整治后 6 a 时间内,随整治年限增加,土壤有机质含量呈现出先减少后增加的趋势,6 a 时含量低于整治前;土壤全氮和有效磷含量呈现先增加后减少的趋势,6 a 时高于整治前;土壤速效钾含量持续降低。合理的耕种管理措施能较快抵消因土地整治扰动对土壤养分带来的负面影响,产生正面影响。后期应注重土壤有机质含量水平提升。

(3) 沟道土地整治后 3 a,土壤养分评价等级恢复到整治前水平,且有继续提高的潜力,可根据沟道不同位置土壤养分变异特征,调整沟道作物的空间布局,实施不同程度和方法的管理措施,提高养分资源的利用率,增加粮食产量。

[参 考 文 献]

[1] 朱显谟. 黄土高原土地的整治问题[J]. 水土保持通报, 1984, 4(4): 1-6.

[2] 陈怡平, 骆世明, 李凤民, 等. 对延安黄土沟壑区农业可持续发展的建议[J]. 地球环境学报, 2015, 6(5): 265-269.

[3] Chen Yiping, Wang Kaibo, Lin Yishan, et al. Balancing green and grain trade [J]. Nature Geoscience, 2015, 8(10): 739-741.

[4] 刘彦随. 陕西省延安市治沟造地土地整治重大工程项目可行性研究报告[R]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2013: 1-5.

[5] Li Yuheng, Du Guoming, Liu Yansui. Transforming the Loess Plateau of China [J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2016, 3(3): 181-185.

[6] 赵春光. 我市 6 年治沟造地 50 万余亩新增耕地 10 万余亩完成投资 34.14 亿元[N]. 延安日报, 2018-12-7(1).

[7] 韩磊, 李锐, 朱会利. 基于 BP 神经网络的土壤养分综合评价模型[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 109-115.

[8] 叶艳妹, 吴次芳. 土地整理对土壤性状的影响及其重建技术和工艺研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2002, 28(3): 267-271.

[9] 徐大兵, 邓建强, 刘冬碧, 等. 整治区植烟土壤养分空间变异及肥力适宜性等级评价[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 790-796.

[10] 吴艳. 土地整理及施肥对土壤质量的影响: 以宁波市林场为例[D]. 浙江 杭州: 浙江农林大学, 2017: 9-15.

[11] 华颖, 王子芳, 高明, 等. 土地整理对土壤有效态微量元素的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 253-257.

[12] 王鹏, 段星星, 赵禹, 等. 治沟造地新增耕地的土壤质量评价: 延安宝塔区为例[J]. 西部大开发(土地开发工程研究), 2019, 4(1): 45-49.

[13] 付威, 雍晨旭, 马东豪, 等. 黄土丘陵沟壑区治沟造地土壤快速培肥效应[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 252-261.

[14] 陈淑敏, 金钊, 张晶, 等. 陕北不同沟道土地盐碱化现状及影响因素[J]. 地球环境学报, 2020, 11(1): 81-89.

[15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-108.

[16] 王晨野, 汤洁, 林年丰, 等. 物元模型在区域土壤养分评价中的应用[J]. 土壤通报, 2009, 40(5): 1069-1075.

[17] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994: 119-134.

[18] 国家环境保护总局. 土壤环境质量标准[M]. 北京: 中国标准出版社, 1995.

[19] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 229.

[20] 汤洁, 赵凤琴, 林年丰, 等. 多种模型集成的方法在土壤养分评价中的应用[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2005, 37(1): 109-112.

[21] 杨静涵, 刘梦云, 张杰, 等. 黄土高原沟壑区小流域土壤养分空间变异特征[J]. 自然资源学报, 2020, 35(3): 743-754.

[22] 郝丽婷, 吴发启. 黄土丘陵沟壑区坝地和梯田土壤养分特征与演变[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 16-22.

[23] 张雯雯, 李新举, 陈丽丽, 等. 泰安市平原土地整理项目区土壤质量评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 106-109.

[24] 徐畅, 高明, 谢德体, 等. 土地整理年限对紫色丘陵区土壤质量的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 242-248.

- 50(9):320-328.
- [9] 王飞,刘领,武岩岩,等.玉米花生间作改善花生铁营养提高其光合特性的机理[J].植物营养与肥料学报,2020,26(5):901-913.
- [10] Zhang Xudong, Muhammad K, Xue Xuchke, et al. Ridge-furrow mulching system drives the efficient utilization of key production resources and the improvement of maize productivity in the Loess Plateau of China [J]. *Soil & Tillage Research*, 2019,190:10-21.
- [11] Li Shuxin, Yang Wenyi, Guo Junhong, et al. Changes in photosynthesis and respiratory metabolism of maize seedlings growing under low temperature stress may be regulated by arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2020,154:1-10.
- [12] Wu Wenming, Wang Shiji, Zhang Lin, et al. Subsoiling improves the photosynthetic characteristics of leaves and water use efficiency of rainfed summer maize in the Southern Huang-Huai-Hai Plain of China [J]. *Agronomy*, 2020,10(5):465-476.
- [13] José M Tarjuelo, Juan A Rodriguez-Diaz, Richardo A, et al. Efficient water and energy use in irrigation modernization: Lessons from Spanish case studies [J]. *Agricultural Water Management*, 2015,162:67-77.
- [14] 焦念元,宁堂原,杨萌珂,等.玉米花生间作对玉米光合特性及产量形成的影响[J].生态学报,2013,33(14):4324-4330.
- [15] 张倩,张洪生,宋希云,等.种植方式和密度对夏玉米光合特征及产量的影响[J].生态学报,2015,35(4):1235-1241.
- [16] 于文颖,纪瑞鹏,冯锐,等.不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应[J].生态学报,2015,35(9):2902-2909.
- [17] 马丽,李潮海,付景,等.垄作栽培对高产田夏玉米光合特性及产量的影响[J].生态学报,2011,31(23):156-165.
- [18] 宋振伟,郭金瑞,任军,等.耕作方式对东北雨养区玉米光合与叶绿素荧光特性的影响[J].应用生态学报,2013,24(7):1900-1906.
- [19] 王帅兵,王克勤,宋娅丽,等.等高反坡阶对昆明市松华坝水源区坡耕地氮、磷流失的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):39-45.
- [20] 闫腾云,王克勤,赵洋毅,等.等高反坡阶整地对坡耕地农田耗水及水量平衡的影响[J].水土保持研究,2020,27(4):93-98,104.
- [21] 陈雪,宋娅丽,王克勤.等高反坡阶措施对滇中红壤坡耕地土壤贮水量的影响[J].水土保持研究,2019,26(6):92-99.
- [22] 陈雪,宋娅丽,王克勤,等.基于 VanGenuchten 模型的等高反坡阶下土壤水分特征[J].水土保持研究,2019,26(5):45-52.
- [23] 陈雪,宋娅丽,王克勤,等.布设等高反坡阶对滇中松华坝水源区坡耕地土壤饱和导水率的影响[J].福建农林大学学报(自然科学版),2019,48(5):649-655.
- [24] 唐佐芯,王克勤,李秋芳,等.等高反坡阶对坡耕地产流产沙和氮磷迁移的作用研究[J].水土保持研究,2013,20(1):1-8.
- [25] 郝卫平.干旱复水对玉米水分利用效率及补偿效应影响研究[D].北京:中国农业科学院,2013.
- [26] 杨爱民,孙彦坤,孟莉,等.坡耕地垄作区田保水增产效益的研究[J].干旱地区农业研究,1997,15(4):8-11.
- [27] 王龙昌,邹聪明,张云兰,等.西南“旱三熟”地区不同保护性耕作措施对农田土壤生态效应及生产效益的影响[J].作物学报,2013,39(10):1880-1890.
- [28] 王成雨,张丽琼,宋贺,等.宽行垄作增强苗期淹水夏玉米光合和抗倒性提高产量[J].农业工程学报,2015,31(18):129-135.
- [29] 吕丽华,陶洪斌,夏来坤,等.不同种植密度下的夏玉米冠层结构及光合特性[J].作物学报,2008(3):447-455.
- [30] 张文超.耕作方式对土壤主要理化性状及玉米产量形成的影响[D].黑龙江 大庆:黑龙江八一农垦大学,2017.
- [31] 张瑞富,杨恒山,高聚林,等.深松促进春玉米干物质和磷素的积累与转运[J].农业工程学报,2016,32(19):106-112.

(上接第70页)

- [25] 张露,韩霖昌,马增辉,等.山地丘陵区不同复垦年限空心村整治后土壤特性[J].水土保持学报,2015,29(5):176-180.
- [26] 董博,张东伟,郭天文,等.长期定位施肥对土壤有机碳和微生物量碳的影响[J].土壤通报,2012,43(6):193-198.
- [27] 王媛玲,赵庚星,王庆芳,等.丘陵区土地整理对土壤理化性状的影响[J].农业工程学报,2011,27(9):311-315.
- [28] 王宏庭,金继运,王斌,等.土壤速效养分空间变异研究[J].植物营养与肥料学报,2004,10(4):349-354.
- [29] 肖波,王庆海,李翠,等.黄土高原退耕地复垦对土壤理化性状及空间变异特征的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39(7):185-192.
- [30] 刘彦随,李裕瑞.黄土丘陵沟壑区沟道土地整治工程原理与设计技术[J].农业工程学报,2017,33(10):1-9.
- [31] 薛蕙,刘国彬,张超,等.黄土高原丘陵区坡改梯后的土壤质量效应[J].农业工程学报,2011,27(4):310-316.