

黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤 养分及生态化学计量特征

夏光辉¹, 郭青霞¹, 卢庆民², 杜轶¹, 康庆¹

(1. 山西农业大学 资源环境学院, 山西 太谷 030800; 2. 山西省永和县水利局, 山西 永和 041400)

摘要: [目的] 探究黄土丘陵区土地利用方式变化前后土壤养分及生态化学计量比的变化特征, 为该区农业生产以及生态恢复工作提供科学依据。[方法] 选取山西省永和县岔口小流域因生态工程的实施而改变土地利用方式的坡改梯田(梯田)、退耕还林地(林地)、地埂核桃园地(园地)3种样地为研究对象, 以现有坡耕地为对照, 利用时空互代法, 比较不同土地利用方式变化前后0—20 cm, 20—40 cm土壤C, N, P, K含量以及生态化学计量比的差异。[结果] ①流域各种生态恢复措施实施后, 土壤C, N元素含量明显增加, 梯田、林地、园地0—40 cm土壤有机C含量分别是坡耕地的1.38, 2.44和1.09倍, 全N含量分别是坡耕地的1.76, 2.66, 1.68倍。P, K元素增加量不明显, 林地相比其他2种土地利用方式对C, N元素的固持更加明显; ②通过分析土壤养分化学计量比的关系, 发现流域土壤的限制性元素为C, N元素; ③流域土壤养分及计量比之间存在着稳定的耦合关系, C-N之间的耦合关系最为显著且在各元素和生态化学计量比稳定方面发挥着重要作用。[结论] 流域3种土地利用方式有效地改变了土壤全量养分含量和元素的生态化学计量比, 有利于流域的生态保护和植被修复。

关键词: 黄土丘陵区; 土壤养分; 生态化学计量; 生态恢复措施

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)02-0140-08

中图分类号: S812.2, S158.3

文献参数: 夏光辉, 郭青霞, 卢庆民, 等. 黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤养分及生态化学计量特征[J]. 水土保持通报, 2020, 40(2): 140-147. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.02.020; Xia Guanghui, Guo Qingxia, Lu Qingmin, et al. Soil nutrients and ecological stoichiometry characteristics under different land use patterns in loess hilly area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(2): 140-147.

Soil Nutrients and Ecological Stoichiometry Characteristics Under Different Land Use Patterns in Loess Hilly Area

Xia Guanghui¹, Guo Qingxia¹, Lu Qingmin², Du Yi¹, Kang Qing¹

(1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China;

2. Water Resources Bureau of Yonghe County, Shanxi Province, Yonghe, Shanxi 041400, China)

Abstract: [Objective] The change characteristics of soil nutrients and ecological stoichiometry ratio before and after the change of land use pattern were explored, in order to provide scientific basis for agricultural production and ecological restorations in loess hilly area. [Methods] Three kinds of sample plots, namely, conversion of slope cropland to level terrace (terrace), return the grain plots to forestry (forest land) and terrace walnut garden (garden), were selected as research objects in Chakou small watershed in Yonghe County of Shaanxi Province. Taking the existing slope cropland as the reference substance, the spatio-temporal contrast method was used to compare the contents of C, N, P, K and ecological stoichiometry ratio of 0—20 cm and 20—40 cm soil before and after the change of land use patterns. [Results] ① After the implementation of various ecological restoration measures, the content of soil C and N elements increased significantly. The soil organic C content of 0—40 cm in terrace, forest land and garden land was 1.38, 2.44 and 1.09 times of that

收稿日期: 2019-11-14

修回日期: 2019-12-12

资助项目: 山西省社会科学基金项目“乡村振兴背景下退耕还林可持续生态补偿研究: 以岔口小流域为例”(2019B435); 国家自然科学基金项目(41071345)

第一作者: 夏光辉(1995—), 男(汉族), 河南省周口市人, 硕士研究生, 研究方向为农业资源利用。Email: xgh1806@163.com。

通讯作者: 郭青霞(1969—), 女(汉族), 山西省太原市人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事土地利用规划等方面的研究。Email: gxq696@163.com。

in the slope cropland, and the TN content was 1.76, 2.66 and 1.68 times of that in sloping land, respectively. The increment of P and K elements was not obvious, and the forest land immobilized C and N elements were more obviously than the other two modes of land use. ② The limiting elements of the soil were C and N through the analysis of ecological stoichiometry ratio of soil nutrients. ③ There was a stable coupling relationship between soil nutrients and ecological stoichiometry ratio of the watershed, and the coupling relationship between C and N was the most significant and played an important role in the stability between each element and the ecological stoichiometry ratio. [Conclusion] The three land use patterns effectively changed the total nutrient content of soil and the ecological stoichiometry ratio, which was beneficial to the ecological protection and vegetation restoration in the watershed.

Keywords: loess hilly area; soil nutrients; ecological stoichiometry; ecological restoration measures

生态化学计量学是一门在结合生态学和化学计量学理论的基础上研究生态系统能量和多种化学元素平衡的学科^[1-2]。碳(C)、氮(N)、磷(P)、钾(K)等化学元素是土壤养分的重要组成部分也是植物生长发育所必需的元素,土壤中C,N,P,K的生态化学计量特征会影响到生态系统中植物的生长发育、种群结构以及群落演替,土壤是生态系统中物质和能量的交换场所,土壤中各种养分之间存在着一定的耦合关系,单方面考虑土壤中某种元素的含量是不全面的,还需要了解元素之间的关系及比例^[3-5]。土壤在全球C,N循环中扮演者重要的角色,全球土壤有机碳库的有机碳储量在1 200~2 500 Pg之间,约是大气碳储量的2倍,植被碳储量的2~3倍。同时土壤还具有巨大的氮汇能力,土壤中的P,K元素在生态系统中具有重要作用,是限制植物生长的重要因素之一^[6-7]。因此,了解土壤中养分元素的生态化学计量特征对农业生产以及生态恢复具有重要的指导意义。

黄土丘陵区是我国生态环境脆弱区,严重土壤侵蚀导致土壤中的C,N,P,K等营养元素大量的流失,不仅造成面源污染还会致使土壤贫瘠影响植物的生长发育,形成恶性循环^[8-9]。近些年来,我国黄土丘陵区实施了一系列的生态恢复措施来改变这一现状,退耕还林(草)、坡改梯工程、淤地坝建设等一系列生态恢复措施可以有效地减少土壤侵蚀,从而起到固土保肥和恢复植被等生态作用^[10-12]。探究黄土丘陵区不同生态恢复措施土壤养分生态化学计量特征具有重要的实践意义。近些年来,在针对黄土丘陵区土壤养分生态化学计量特征研究日益丰富,主要聚焦于不同植被种类或密度、不同自然条件对土壤和植物组织化学计量比的影响^[13-16]。在不同生态恢复措施及不同土地利用方式对土壤养分生态计量特征的影响研究方面也有较多的研究^[17-18],但很少对土壤养分做出系统全面的阐述。为此,本文以黄土丘陵区典型小流域为研究区,通过比较因生态工程实施而造成的土地

利用方式改变前后土壤的全量养分以及生态化学计量特征的差异,揭示不同土地利用方式对黄土丘陵区生态恢复所起到的作用。

1 材料和方法

1.1 研究区概括

岔口小流域位于山西省永和县、隰县、石楼县三县交界处的芝河流域源头地带,属于典型的黄土丘陵沟壑区第一副区的代表性流域,流域面积为131.91 km² (36°47'26"—36°57'14"N,110°38'01"—110°50'02"E)。流域属于典型的暖温带半干旱大陆性季风气候,年平均气温约8.6℃,年降雨量约为530.9 mm,且多集中在7—9月份。流域内地形地势复杂,生态环境比较脆弱,经济来源主要以第一产业为主。近些年来,为了改善流域内的生态环境,岔口小流域实施了一系列生态恢复措施,退耕还林、坡改梯工程,地埂核桃经济林工程等改变了原有的土地利用方式,促进了流域生态的恢复。其中,坡改梯工程和核桃林不仅能够起到生态恢复作用还兼顾经济效益。

1.2 样地设置及样本采集

通过实地调查、走访相关政府部门与当地居民,结合遥感影像分别选取退耕还林地(林地)、坡改梯地(梯田),核桃林地(园地)和坡耕地各4块样地,每个样地在相似坡位处设置3个20×20 m的样方,在同一个样方内分别采取0—20 cm,20—40 cm 2个土层的样品,每个样品是由“S”采样法采取5个样点混合而成。流域共采取土壤样品96个。各类样地信息详见表1。

表1 岔口流域不同土地利用方式采样样地特征描述

样地类型	经度 E	纬度 N	坡向	坡度/ (°)	植被情况
梯田	110.70°	36.89°	半阳坡	0	玉米
林地	110.69°	36.88°	半阳坡	27	柠条、刺槐混种
园地	110.71°	36.90°	半阳坡	0	核桃
坡耕地	110.70°	36.90°	半阳坡	15	玉米

1.3 样品分析与数据处理

土样的测定:土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾外加热法测定;全氮(TN)采用半微量凯氏定氮法,全磷(TP)采用氢氧化钠碱熔—钼锑抗比色法,全钾(TK)采用氢氧化钠熔融分光光度法^[19];元素化学计量比采用质量比^[12]。采用 SPSS 25 对数据进行描述性统计和 Pearson 相关系数的计算,用 DPS 进行多重比较(LSD),制图软件采用 SigmaPlot 14.0。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下土壤全量养分变化特征

表 2 和图 1—2 的统计结果表明,研究区梯田、林地、园地 0—40 cm SOC 的含量的均值分别为 4.07,

7.23 和 3.24 g/kg,分别是对照坡耕地(2.96 g/kg)的 1.38,2.44,1.09 倍,林地和梯田 0~40 cm SOC 含量显著($p<0.05$)大于坡耕地,园地与坡耕地的差异不明显。土壤 N 含量方面,各样地 0—40 cm 土壤 TN 含量分别为 0.72,1.09,0.69 和 0.41 g/kg,梯田、林地、园地 TN 含量分别是对照坡耕地的 1.76,2.66 和 1.68 倍,3 种生态恢复措施土壤 TN 含量均显著($p<0.05$)的大于坡耕地。4 种样地 SOC, TN 含量在各层的分布都表现为上层(0—20 cm)显著($p<0.05$)的大于下层(20—40 cm),变异系数方面,流域 SOC 和 TN 的变异系数分别分布在 5.08%~42.72%,12.31%~22.65% 之间, SOC 和 TN 变异系数在各样地之间的大小都表现为:园地>林地>梯田>坡耕地的规律。

表 2 不同土地利用方式下土壤 C、N、P、K 及 C:N 描述性统计

类型	土层/cm	指标	SOC/(g·kg ⁻¹)	TN/(g·kg ⁻¹)	TP/(g·kg ⁻¹)	TK/(g·kg ⁻¹)	C:N
梯田	0—20	均值	4.52±0.17 ^a	0.77±0.04 ^a	0.62±0.01 ^a	18.29±0.24 ^a	6.02±0.26 ^a
		变异系数/%	13.38	18.68	6.98	4.50	15.03
	20—40	均值	3.62±0.23 ^b	0.68±0.02 ^b	0.60±0.01 ^a	17.86±0.31 ^a	5.36±0.33 ^a
		变异系数/%	22.10	11.80	6.83	6.05	21.42
0—40	均值	4.07±0.18 ^{ab}	0.72±0.03 ^b	0.61±0.01 ^a	18.07±0.21 ^a	5.69±0.27 ^a	
	变异系数/%	15.61	14.64	6.75	3.96	16.26	
林地	0—20	均值	9.03±0.54 ^a	1.28±0.07 ^a	0.62±0.02 ^a	16.52±0.35 ^a	7.29±0.65 ^a
		变异系数/%	20.69	19.08	10.26	7.44	30.82
	20—40	均值	5.42±0.44 ^c	0.91±0.06 ^c	0.59±0.02 ^a	15.39±0.53 ^a	6.00±0.30 ^a
		变异系数/%	28.27	22.65	10.54	11.94	17.11
0—40	均值	7.23±0.41 ^b	1.09±0.06 ^b	0.60±0.02 ^a	15.95±0.39 ^a	6.72±0.39 ^a	
	变异系数/%	19.89	19.88	10.52	8.40	20.04	
园地	0—20	均值	4.03±0.50 ^a	0.73±0.04 ^a	0.63±0.02 ^a	16.53±0.39 ^a	5.38±0.48 ^a
		变异系数/%	42.71	19.07	9.95	8.15	30.63
	20—40	均值	2.45±0.29 ^c	0.64±0.04 ^a	0.58±0.01 ^b	15.12±0.46 ^b	3.84±0.38 ^b
		变异系数/%	41.07	20.77	8.13	10.51	34.47
0—40	均值	3.24±0.38 ^b	0.69±0.03 ^a	0.60±0.01 ^{ab}	15.82±0.34 ^{ab}	4.63±0.39 ^{ab}	
	变异系数/%	40.90	16.23	8.65	7.55	29.00	
坡耕地	0—20	均值	3.49±0.06 ^a	0.48±0.02 ^a	0.62±0.02 ^a	16.09±0.21 ^a	7.30±0.19 ^a
		变异系数/%	5.80	12.31	11.24	4.59	8.88
	20—40	均值	2.44±0.08 ^c	0.35±0.02 ^c	0.55±0.01 ^b	15.09±0.18 ^b	7.17±0.30 ^a
		变异系数/%	11.64	19.24%	7.80%	4.29%	14.64%
0—40	均值	2.96±0.07 ^b	0.41±0.02 ^b	0.59±0.01 ^{ab}	15.59±0.19 ^{ab}	7.23±0.20 ^a	
	变异系数/%	7.67	14.50	8.02	4.15	9.74	

注:数据为平均值±标准误差,0—40 cm 土壤数据为 0—20 cm,20—40 cm 土壤数据的算术平均值,不同字母代表同一措施不同土层间差异性显著($p<0.05$)。下同。

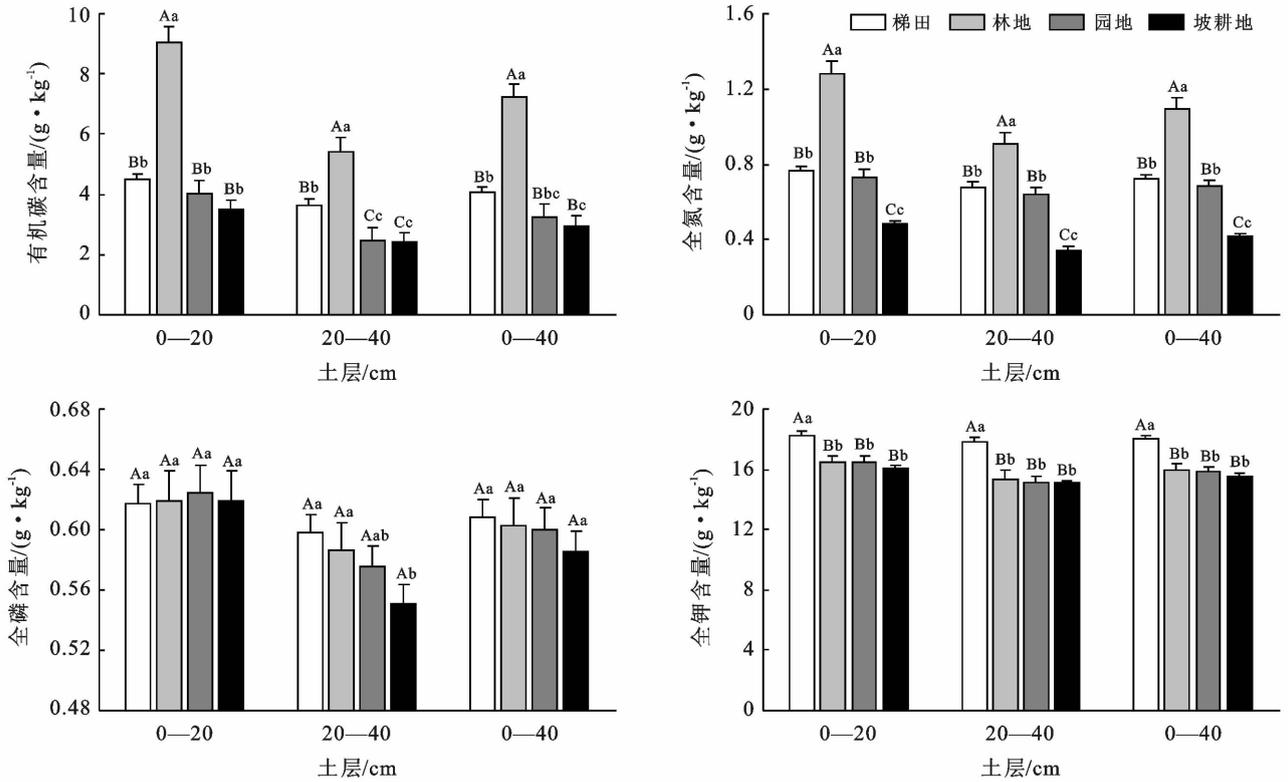
研究区土壤 P、K 元素方面,由图 1 可知,梯田、林地、园地与坡耕地 0—40 cm 土壤 TP 含量差异不显著,分别为 0.61,0.60,0.60 和 0.59 g/kg,梯田、林地土壤 TP 上下层差异性不显著,园地和坡耕地土壤 TP 含量表现为上层显著($p<0.05$)的大于下层,各样

地土壤 TP 的变异系数也都分布在 6.75%~11.24% 之间,变异程度较弱。

0—40 cm 土壤 TK 含量在各个样地之间表现为:梯田>林地>园地>坡耕地,分别为 18.07,15.95,15.82 和 15.59 g/kg,梯田 TK 含量显著大于坡耕地,

林地和园地与坡耕地的差异并不显著,同一类样地不同土层之间,除了园地上层土壤 TK 含量大于下层

外,其余 3 种样地的土壤 TK 含量在上下土层之间差异不明显。



注:不同大小写字母分别表示同一土层不同土地利用方式在 0.01,0.05 水平下显著。下同。

图 1 不同土地利用方式下土壤全量养分多重比较结果

2.2 不同土地利用方式下土壤生态化学计量比变化特征

由图 2 可知,流域各样地 0—40 cm 土壤 C : N 均值大小表现为:坡耕地 > 林地 > 梯田 > 园地,坡耕地土壤 C : N 均值显著 ($p < 0.05$) 的大于梯田和园地,略高于林地但无显著性差别,研究区样地土壤 C : N 总体分布在 8.90~2.17 范围内,变异系数在 8.88%~30.82%,林地 0—20 cm 土壤 C : N 变异系数最大,坡耕地 0—20 cm 土壤 C : N 变异系数最小。各样地不同土层间,除了园地上下层之间土壤 C : N 比差异性显著 ($p < 0.05$) 外,其余 3 种样地上下层含量无显著差别。研究区土壤 C : P, C : K, N : P 均值在各样地 0—40 cm 土壤中表现为:林地 > 梯田 > 园地 > 坡耕地。其中,林地 0—40 cm 土壤的 C : P, C : K, N : P 均值都极显著 ($p < 0.01$) 大于坡耕地;梯田 0—40 cm 土壤 C : P 显著 ($p < 0.05$) 的大于坡耕地, N : P 极显著 ($p < 0.01$) 的大于坡耕地,而 C : K 值差异不显著;园地 0—40 cm 土壤 N : P 极显著的大于坡耕地,而 C : P, C : K 值与坡耕地差异不明显。各样地 C : P, C : K 值在不同土层之间都表现为上层显著 ($p < 0.05$) 大于下层,梯田和园地 N : P 值上下层无显著差别,林地和坡耕地 N : P 值表现出上层显

著的大于下层。研究区 3 种生态恢复措施土壤 N : K 值都极显著的大于坡耕地,在各个样地的大小表现为:林地 > 园地 > 梯田 > 坡耕地,0—40 cm 土壤 P : K 值在各个样地的含量差异性不大,不同土层之间的含量也无显著性差别(表 3)。

2.3 不同土地利用方式下土壤全量养分和化学计量比之间的关系

表 4 中的计算结果显示,全量养分元素方面, C-N 和 N-K 元素之间呈现出极显著 ($p < 0.01$) 的正相关外,其他元素两两之间相关性不显著;全量养分与化学计量比之间, C, N 分别与除 P : K 之外的化学计量比都有极显著的相关性, P 元素与 N : P 呈现出显著 ($p < 0.05$) 的负相关性,与 P : K 有着极显著的正相关性, K 元素与 N : K, P : K 分别有着显著和极显著的负相关性;各计量比之间,除 P : K 与各计量比相关性不显著之外,其余各计量比两两之间都有极显著的正相关性。由图 3 可知,流域土壤 C-N, N-CN, N-NP, N-NK 之间呈现出极显著的三次函数关系,土壤 C-CP, C-CK, P-PK, K-PK 之间有极显著的二次函数关系, C-CN 之间是极显著的指数型函数关系,其余指标之间的函数关系不明显。

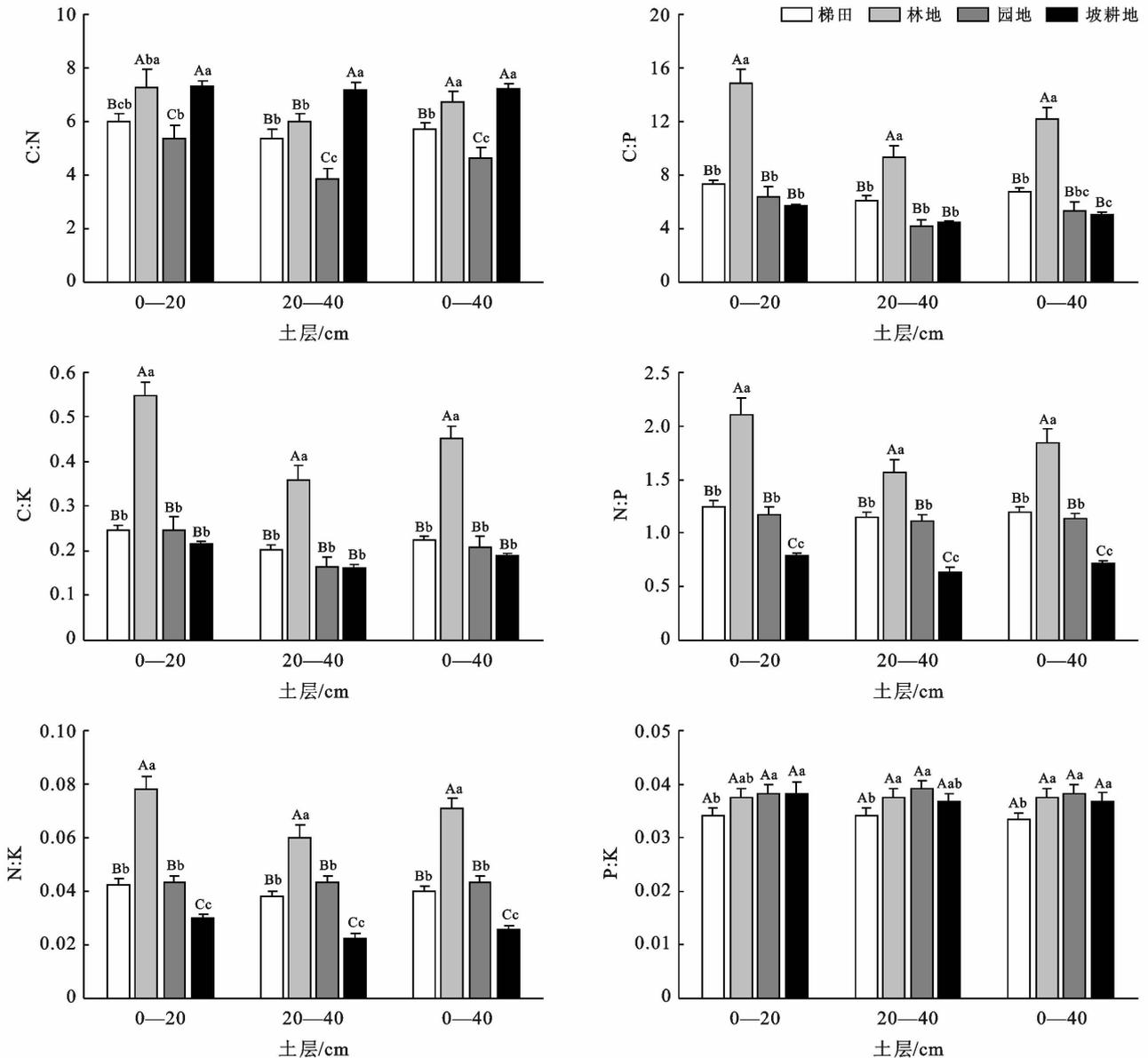


图 2 不同土地利用方式下土壤计量比多重比较结果

3 讨论

3.1 不同土地利用方式对土壤 C,N,P,K 含量的影响

土壤 C,N,P,K 是植物生长发育所必需的的元素,也是衡量土壤质量的重要指标^[20-21]。研究区梯田、林地、园地 3 种生态恢复措施相比于坡耕地土壤 C 含量提高了 0.38,1.44,0.09 倍,土壤 N 含量提高了 0.76,1.66,0.68 倍。杜宁宁等^[22]研究发现土地利用方式转变后会影响到土壤的碳氮循环的强度,李欣雨等^[23]认为土地利用方式的变化会影响到 SOC 的矿化速率,有机质是土壤的主要 C 源和 N 源^[24],SOC 和 TN 含量在不同土地利用方式下存在差异,除了自身环境因素的影响外,有机质输入的数量和质量也会对 SOC 和 TN 的含量产生重大的影响,3 种生态恢复

措施中林地的植物残体输入量最高,其 SOC 和 TN 增加也最为明显,梯田除了部分秸秆还田外,土壤中还保留着大量的根系组织,为土壤提供了大量的 C 和 N 源,而坡耕地由于管理方式和自身环境条件,C 源和 N 源相对匮乏,坡耕地耕作频繁使土壤中的大团聚体遭到破坏,严重的土壤侵蚀造成土壤中的 N 元素大量流失。3 种生态恢复措施显著的改变原有坡耕地的植被和坡度等因素,有利于土壤特别是表层土壤 C,N 元素的积累。

3 种生态恢复措施 0—40 cm 土壤 TP 含量与坡耕地差别都不明显,这与李占斌^[12]、曾全超等^[25]人的研究结论一致,但不同于张晗等^[20]人的,这可能是由于所处的研究区不同,研究区土壤的类型、成土母质、气候条件、管理方式、特别是成土母质不同所导致

的^[1,21];不同生态恢复措施各层土壤在 TK 含量上呈现出:梯田>林地>园地>坡耕地,其中,梯田极显著的大于坡耕地,林地、园地和坡耕地无显著性差别,

TK 含量主要受到成土母质的影响,梯田土壤 TK 含量显著大于坡耕地可能是因为施肥的原因所导致^[26]。

表 3 不同土地利用方式下土壤化学计量比描述性统计

类型	土层/cm	指标	C : P	C : K	N : P	N : K	P : K
梯田	0—20	均值	7.34±0.31 ^a	0.25±0.01 ^a	1.24±0.07 ^a	0.04±0.002 ^a	0.03±0.001 ^a
		变异系数/%	14.67	14.12	18.89	17.74	15.06
	20—40	均值	6.09±0.40 ^b	0.20±0.01 ^b	1.14±0.05 ^a	0.04±0.002 ^a	0.03±0.001 ^a
		变异系数/%	23.02	19.93	15.09	15.07	15.06
	0—40	均值	6.72±0.32 ^{ab}	0.22±0.01 ^{ab}	1.19±0.06 ^a	0.04±0.002 ^a	0.03±0.001 ^a
		变异系数/%	16.59	14.79	16.08	15.08	14.77
林地	0—20	均值	14.83±1.05 ^a	0.55±0.03 ^a	2.11±0.16 ^a	0.08±0.005 ^a	0.04±0.002 ^a
		变异系数/%	24.52	20.60	25.66	20.97	16.59
	20—40	均值	9.37±0.84 ^c	0.36±0.03 ^c	1.57±0.12 ^b	0.06±0.005 ^b	0.04±0.002 ^a
		变异系数/%	30.88	32.17	26.23	26.58	16.59
	0—40	均值	12.17±0.84 ^b	0.45±0.03 ^b	1.84±0.13 ^{ab}	0.07±0.004 ^{ab}	0.04±0.002 ^a
		变异系数/%	24.03	20.12	24.79	20.38	16.59
园地	0—20	均值	6.40±0.75 ^a	0.25±0.03 ^a	1.18±0.07 ^a	0.04±0.003 ^a	0.04±0.002 ^a
		变异系数/%	40.68	45.32	19.80	20.51	15.07
	20—40	均值	4.24±0.47 ^b	0.17±0.02 ^b	1.11±0.06 ^a	0.04±0.003 ^a	0.04±0.001 ^a
		变异系数/%	38.80	43.90	19.42	20.51	13.14
	0—40	均值	5.36±0.60 ^{ab}	0.21±0.03 ^{ab}	1.14±0.05 ^a	0.04±0.002 ^a	0.04±0.002 ^a
		变异系数/%	38.66	41.87	14.64	17.97	15.07
坡耕地	0—20	均值	5.68±0.17 ^a	0.22±0.004 ^a	0.78±0.03 ^a	0.03±0.001 ^a	0.04±0.002 ^a
		变异系数/%	10.42	7.19	14.99	14.20	18.75
	20—40	均值	4.45±0.17 ^c	0.16±0.006 ^c	0.64±0.04 ^b	0.02±0.002 ^c	0.04±0.001 ^a
		变异系数/%	13.46	13.67	22.20	27.64	13.41
	0—40	均值	5.08±0.13 ^b	0.19±0.005 ^b	0.71±0.03 ^{ab}	0.03±0.001 ^b	0.04±0.002 ^a
		变异系数/%	8.75	9.25	15.98	19.96	17.74

表 4 各指标间的相关系数

项目	SOC	TN	TP	TK	C : N	C : P	C : K	N : P	N : K	P : K
SOC	1									
TN	0.925**	1								
TP	0.001	-0.107	1							
TK	-0.099	0.469**	-0.012	1						
C : N	0.822**	0.560**	0.200	0.008	1					
C : P	0.982**	0.935**	-0.179	-0.095	0.765**	1				
C : K	0.978**	0.915**	-0.005	-0.294	0.782**	0.962**	1			
N : P	0.861**	0.964**	-0.363*	-0.114	0.465**	0.921**	0.854**	1		
N : K	0.871**	0.935**	-0.112	-0.412*	0.527**	0.883**	0.923**	0.906**	1	
P : K	-0.009	-0.068	0.549**	-0.693**	0.084	-0.102	0.130	-0.203	0.137	1

注: ** 表示显著性水平为 0.01, * 表示显著性水平为 0.05。

从 C, N, P, K 在不同恢复措施土壤的垂直分布上看,梯田、林地和园地 0—20 cm 土壤全量养分的均值均大于 20—40 cm,其中除了梯田和林地 0—20 cm 土壤 TP 和 TK 含量与 20—40 cm 的不显著以外,其他恢复措施土壤的全量指标均在 $p < 0.05$ 水平下有显

著差别。表层最容易受到外界环境的影响,人为干扰和动植物残体主要作用于表层,加上表层土壤土质疏松,土壤的水、肥、气、热条件和微生物活性优于深层土壤,导致表层土壤的理化性质和水肥条件优于深层土壤,这与其他文献的研究结论基本一致^[27-28]。

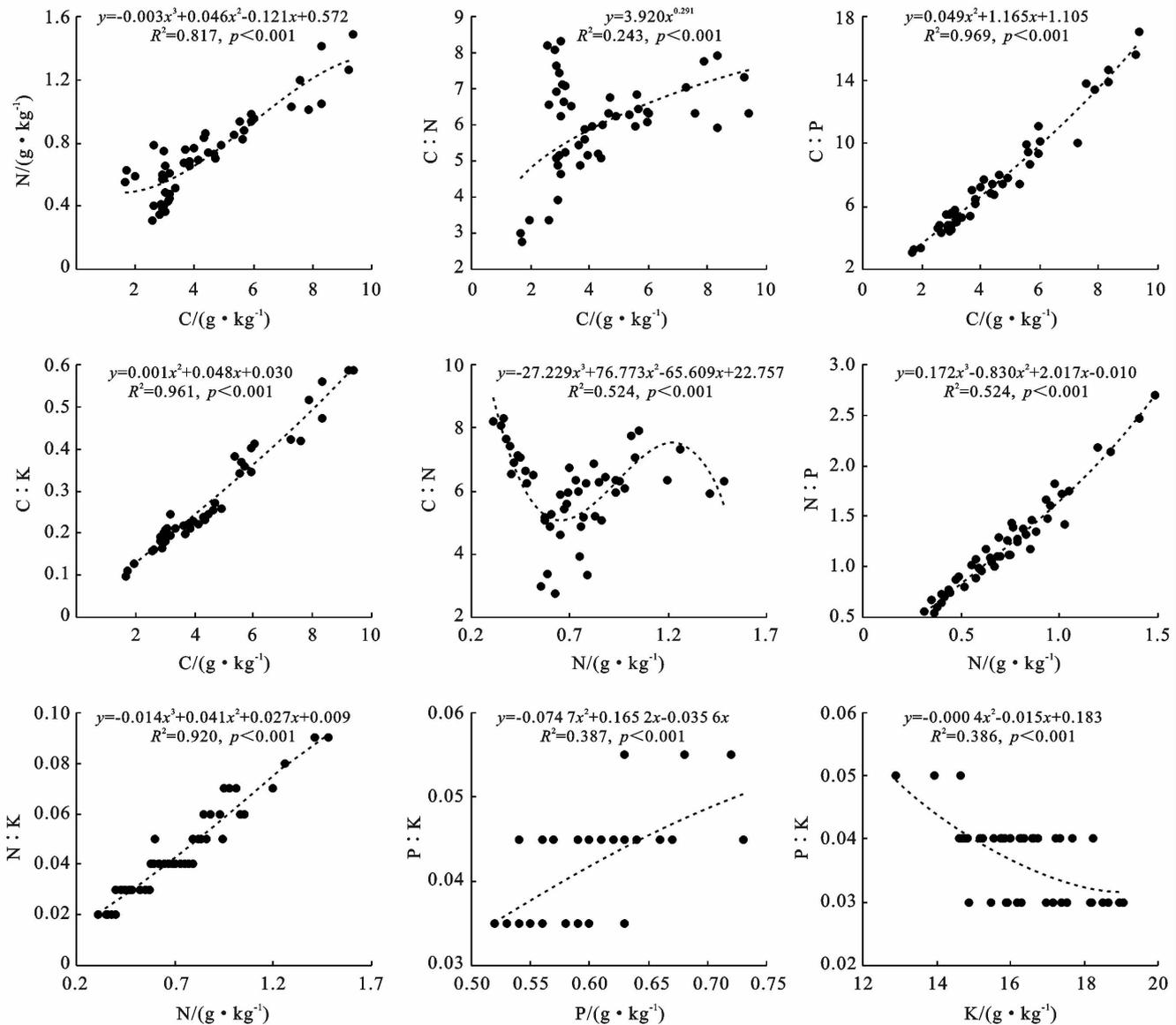


图 3 流域 0—40 cm 土壤全量养分及计量比之间的函数关系

3.2 不同土地利用方式对土壤养分元素化学计量比的影响

流域各样地土壤 C:N 指标在不同土层上均表现为:坡耕地>林地>梯田>园地,但 4 种样地土壤 C:N 值明显的小于 25, C:N 值与有机质分解释放出的 N 的数量成反比, C:N 值越小,说明有机质分解和矿化的速度较快,不利于养分的积累^[1,29], 3 种样地中,由于林地土壤蓄水能力强,植物残体多使得林地土壤 C 源相对充足,土壤 N 素矿化速率低,所以导致林地的 C:N 值高于梯田和园地,而坡耕地 C:N 值较高的原因是由于频繁的翻耕导致土壤中的 N 元素大量流失,并且坡耕地微生物活性相对较低, C 的矿化速率较低,最终导致坡耕地土壤 C:N 值显著高于 3 种土地利用方式^[20]。3 种恢复措施中,林地更有助于促进土壤有机质的腐殖化过程,有利于土壤

养分特别是 C, N 元素的富集,具有更好的生态恢复效果。

4 种样地 0—40 cm 土壤 C:P 和 N:P 指标有:林地>梯田>园地>坡耕地的规律,土壤中的 P 元素对植物的生长起着重要作用, C:p 值通常被认为是土壤 P 元素矿化的指标,也是土壤有机质矿化释放出 P 素和从环境中固持 P 素的指标^[3,24,30], 流域 0—40 cm 土壤 C:P 均值的范围为 5.36~12.17, 远低于我国土壤 C:P 的均值 61, 有研究表明当 C:P 值<200 时,土壤微生物 C 素含量会在短时间内增加, P 素含量也会出现净矿化,土壤中 P 素含量会增加^[30-31], 4 种样地土壤 C:P 值都远小于 200, 说明流域植被的生长不会受到 P 元素的限制。N, P 元素被认为是陆地生态系统的限制性元素, N:P 常被用来作为养分阈值的确定和土壤养分限制因子的诊断^[32-33]。流域

0—40 cm 土壤 N:P 的范围为:0.64~1.84,同样低于全国土壤 N:P 均值 5.2,说明流域土壤中 N 素相对缺乏。

流域土壤 C:K 均值在不同土地利用方式中表现为:林地>梯田>园地>坡耕地,N:K 均值表现为:林地>园地>梯田>坡耕地,由于除了梯田土壤 K 元素异常突出外,其他 3 种样地 K 元素含量差异不大,所以 N:K 指标主要受到 N 元素含量的影响。P:K 值在 4 种样地 0—40 cm 土壤中表现为:园地>林地>坡耕地>梯田,其中,林地的 C:K 均值极显著的大于坡耕地,主要是因为林地土壤的 C 含量大于坡耕地,当前大多数相关研究都集中在 C,N,P 的研究上,对土壤 K 元素以及 K 和其他元素计量比的研究相对缺乏^[30],流域土壤 TK 含量处在第二次全国土壤养分分等定级中的第 3 等级,高于西南喀斯特地区(3.33 g/kg)^[29]和湖南平江县福寿山杉木林地(5.52 g/kg)^[3],土壤 TK 含量相对较高,相对来说讲 C,N 元素相对缺乏。

4 结论

(1) 与坡耕地相比,流域因生态恢复措施导致的土地利用方式的变化能够显著的增加土壤中 C,N 的含量,P,K 含量虽无显著性变化,但含量有所增加。梯田、林地、园地 SOC 含量分别是坡耕地的 1.38, 2.44, 1.09 倍,土壤 TN 含量分别是坡耕地 1.76, 2.66, 1.68 倍,林地相比于其他生态恢复措施对 C,N 元素的固定更为理想。

(2) 流域土壤 C:N 值相对较低,不利于有机质的积累,C:K,C:P 主要受 C 元素的影响,N:P,N:K 受 N 元素的影响较大,C,N 为流域土壤养分的限制元素,应进一步实施生态恢复措施,增加土壤中 C,N 元素的含量。

(3) 流域土壤元素之间具有稳定的耦合关系,C-N 之间的耦合关系在维持元素平衡方面起着主要的作用。

[参 考 文 献]

[1] 张剑,宿力,王利平,等. 植被盖度对土壤碳、氮、磷生态化学计量比的影响:以敦煌阳关湿地为例[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 580-589.

[2] 刘丹,陈清,王义东,等. 天津市芦苇沼泽底泥中的碳、氮和磷分布及其生态化学计量学特征[J]. 湿地科学, 2016, 14(6): 908-915.

[3] 曹小玉,李际平,等. 不同龄组杉木林土壤碳、氮、磷的生态化学计量特征[J]. 土壤, 2019, 51(2): 290-296.

[4] 陶冶,张元明,周晓兵. 伊犁野果林浅层土壤养分生态化

学计量特征及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2239-2248.

- [5] 玛孜依热阿·努尔海拉提,陶冶,周晓兵,等. 新疆野苹果群落表层土壤化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2019, 38(9): 2638-2647.
- [6] 周启龙,多吉顿珠,陈少锋,等. 西藏北部不同草地类型土壤碳、氮、磷的变化特征[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 251-255.
- [7] 罗薇,张会化,陈俊坚,等. 广东省土壤有机碳储量及分布特征[J]. 生态环境学报, 2018, 27(9): 1593-1601.
- [8] Shi Peng, Zhang Yan, Li Peng, et al. Distribution of soil organic carbon impacted by land-use changes in a hilly watershed of the Loess Plateau, China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 652: 505-512.
- [9] 高儒学,戴全厚,甘艺贤,等. 不同雨强下喀斯特坡耕地养分流失特征研究[J]. 土壤学报, 2019, 56(5): 1072-1084.
- [10] 徐勇,安祥生,杨波,刘普灵. 黄土高原坡改梯综合效益分析:以燕沟流域为例[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(1): 1-5, 12.
- [11] 郭曼,郑粉莉,和文祥,等. 黄土丘陵区不同退耕年限植被多样性变化及其与土壤养分和酶活性的关系[J]. 土壤学报, 2010, 47(5): 979-986.
- [12] 李占斌,周波,马田田,等. 黄土丘陵区生态治理对土壤碳氮磷及其化学计量特征的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 312-318.
- [13] 赵晓单,曾全超,安韶山,等. 黄土高原不同封育年限草地土壤与植物根系的生态化学计量特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(6): 1541-1551.
- [14] 白雪娟,曾全超,安韶山,等. 黄土高原不同人工林叶片—凋落叶—土壤生态化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3823-3830.
- [15] 刘洋,曾全超,安韶山,李鑫,黄懿梅. 黄土丘陵区草本植物叶片与枯落物生态化学计量学特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(06): 1793-1800.
- [16] 马任甜,安韶山,黄懿梅. 黄土高原不同林龄刺槐林碳、氮、磷化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(9): 2787-2793.
- [17] 张祎,任宗萍,李鹏,等. 黄土丘陵区小流域生态恢复对土壤有机碳和全氮的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 97-103.
- [18] 周瑶,马红彬,贾希洋,等. 不同恢复措施对宁夏典型草原土壤碳氮储量的影响[J]. 草业学报, 2017, 26(12): 236-242.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000.
- [20] 张晗,欧阳真程,赵小敏. 不同利用方式对江西省农田土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39(3): 939-951.

- 保持,1992(12):5-9,67.
- [2] 张新玉,杨元辉.我国水土保持小流域综合治理模式研究[J].中国水利,2011(12):58-61.
- [3] 张洪江,张长印,赵永军,等.我国小流域综合治理面临的问题与对策[J].中国水土保持科学,2016,14(1):131-137.
- [4] 刘震.坚持成功经验 不断开拓创新 努力提高小流域综合治理水平[J].中国水土保持,2008(4):1-3,10.
- [5] 段巧甫,郭廷辅.从西北五省区水土保持经验看西部生态环境建设[J].中国水土保持,2002(1):6-8,45.
- [6] 董仁才,余丽军.小流域综合治理效益评价的新思路[J].中国水土保持,2008(11):22-24.
- [7] 梁会民,赵军.小流域综合治理的生态经济效益评估研究[J].生态经济,2001(8):12-14.
- [8] 阎文哲,赵光耀,马国力.黄河流域水土保持综合效益分析[J].人民黄河,1996(5):7-11,39,61-62.
- [9] 刘震.扎实推进水土保持生态清洁小流域建设[J].中国水土保持,2010(1):5-6,13.
- [10] Silva R M D, Montenegro S M G L, Santos C A G E. Integration of GIS and remote sensing for estimation of soil loss and prioritization of critical sub-catchments: A case study of Tapacurá catchment [J]. *Natural Hazards*, 2012, 62(3):953-970.
- [11] Zhao P, Xia B, Hu Y, et al. A spatial multi-criteria planning scheme for evaluating riparian buffer restoration priorities [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 54: 155-164.
- [12] Shen Z, Zhong Y, Huang Q, et al. Identifying non-point source priority management areas in watersheds with multiple functional zones [J]. *Water Research*, 2015, 68:563-571.
- [13] Ahn S R, Kim S J. Assessment of watershed health, vulnerability and resilience for determining protection and restoration priorities [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2017, 22:1-19.
- [14] 中华人民共和国水利部. SL34-92 水文站网规划技术导则[S].北京:水利电力出版社,1992.
- [15] 中华人民共和国水利部. SL653-2013 小流域划分及编码规范[S].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [16] 符素华,刘宝元,周贵云,等.坡长坡度因子计算工具[J].中国水土保持科学,2015,13(5):105-110.

(上接第 147 页)

- [21] Wang Miaomiao, Chen Hongsong, Zhang Wei, et al. Soil nutrients and stoichiometric ratios as affected by land use and lithology at county scale in a karst area, Southwest China [J]. *The Science of the Total Environment*, 2018,619-620.
- [22] 杜宁宁,邱莉萍,张兴昌,等.半干旱区土地利用方式对土壤碳氮矿化的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(5):73-78.
- [23] 李欣雨,夏建国,鄢广奎,等.名山河流域不同土壤类型和土地利用方式下有机碳的分布特征[J].水土保持学报,2017,31(3):224-230,238.
- [24] 高君亮,罗凤敏,高永,等.农牧交错带不同土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量特征[J].生态学报,2019,39(15):5594-5602.
- [25] 曾全超,李鑫,董扬红,等.黄土高原延河流域不同植被类型下土壤生态化学计量学特征[J].自然资源学报,2016,31(11):1881-1891.
- [26] 马芊红,张光辉,耿韧,等.黄土高原纸坊沟流域不同土地利用类型土壤质量评价[J].水土保持研究,2018,25(4):30-35,42.
- [27] 李慧,王百田,刘涛.晋西黄土区不同森林树种及其林地土壤养分含量的变化[J].林业科学研究,2016,29(4):587-595.
- [28] 李海强,郭成久,蔡楚雄,等.水土保持措施对坡耕地土壤养分时空变异影响[J].土壤通报,2017,48(3):707-714.
- [29] 王霖娇,汪攀,盛茂银.西南喀斯特典型石漠化生态系统土壤养分生态化学计量特征及其影响因素[J].生态学报,2018,38(18):6580-6593.
- [30] 吴鹏,崔迎春,赵文君,等.喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤化学计量特征[J].北京林业大学学报,2019,41(3):80-92.
- [31] 许宇星,王志超,竹万宽,杜阿朋.雷州半岛不同林龄桉树人工林土壤化学计量特征[J].云南农业大学学报(自然科学版),2019,34(3):486-493.
- [32] 杨巧云,赵允格,包天莉,等.黄土丘陵区不同类型生物结皮下的土壤生态化学计量特征[J].应用生态学报,2019,30(8):2699-2706.
- [33] 杜映妮,李天阳,何丙辉.长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤 C, N, P 和 K 化学计量特征[J/OL]. *环境科学*:1-12[2019-09-19]. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.201907098>.