

谷佳慧,杨奇勇,蒋忠诚,等. 广南县幅岩溶区与非岩溶区土壤碳氮磷生态化学计量比空间变异分析[J]. 中国岩溶,2018,37(5): 761-769.

DOI:10.11932/karst20180514

广南县幅岩溶区与非岩溶区土壤碳氮磷生态 化学计量比空间变异分析

谷佳慧^{1,2},杨奇勇²,蒋忠诚²,罗为群²,曾红春^{1,2},覃星铭²,蓝芙宁²

(1. 中国地质大学(北京),北京 100083;

2. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室,广西 桂林 541004)

摘要:借助1:25万云南省广南县幅土壤地球化学调查数据,并利用单因素方差分析、多重比较法以及地统计学方法,对岩溶区和非岩溶区土壤碳氮磷生态化学计量特征及其空间分布进行了对比分析。结果显示:广南县幅岩溶区土壤中有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量显著高于非岩溶区,而碳氮比(C:N)、碳磷比(C:P)、氮磷比(N:P)显著低于非岩溶区;无论是岩溶区还是非岩溶区,表层(0~20 cm)SOC、TN、C:N、C:P、N:P均显著高于深层(>100 cm)。克里格空间插值结果表明,研究区表层土壤中SOC、TN、TP含量具有东高西低的特征,而C:N、C:P、N:P具有低值区集中于东部、高值区散布在西部的空间分布格局。成土母质和土壤类型等自然因素严重制约了研究区土壤碳氮磷的空间变异,同时土地利用变化等人为因素也起到了不可忽视的作用。

关键词:土壤;碳氮磷;空间变异;岩溶区;广南县幅

中图分类号:S158

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2018)05-0761-09

0 引言

生态化学计量学是研究生命系统中能量平衡和化学元素平衡的一门科学^[1],现已被广泛应用于各种有关地球化学循环的研究中,如种群动态变化^[2]、限制性养分的判断^[3]、全球碳氮磷生物地球化学循环^[4]等,其中碳氮磷元素是目前研究的核心内容^[5]。土壤碳氮磷比是土壤有机质组成和质量程度的一个重要指标^[6],且对植物的养分状况和微生物的生物量等也具有一定影响^[7-8]。因此,土壤碳氮磷生态化学计量分析对研究土壤,乃至土壤-植被-微生物系统内的养分变化关系具有重要指示意义。

然而,土壤是时空连续的变体,具有高度的空

间异质性^[9]。近年来,随着地理信息技术的不断发展,国内越来越多的学者开始关注和研究土壤碳氮磷生态化学计量的空间变异性。曾全超等^[10]研究黄土高原陕北地区土壤养分及生态化学计量指标的空间变化特征,发现黄土高原土壤碳氮比(C:N)较为稳定,不随纬度变化;随着植被的恢复,相对于高纬度地区,低纬度地区更容易缺磷;高纬度地区的植被更容易受到氮含量的限制。曹祥会等^[11]以河北省为例分析了中温-暖温带表土碳氮磷生态化学计量特征的空间变异性,从而发现土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、碳磷比(C:P)和氮磷比(N:P)的高值区分布在冀北,面积较小;C:N的高值区零星分布在冀北地区,全磷(TP)的高值区和低值区呈现斑块状分

基金项目:中国地质大调查项目(DD20160324);广西科学研究与技术开发项目(桂科攻1598016-11);中国地质科学院基本业务费项目(YYWF201508);国家自然科学基金项目(41502257,41471447)

第一作者简介:谷佳慧(1994-),女,硕士研究生,主要从事土壤空间变异与土壤肥力研究。E-mail:gu_jiahui@yeah.net。

通信作者:杨奇勇(1976-),男,研究员,硕士生导师,主要从事土壤空间变异与土壤质量评估研究。E-mail:yangqiyong0739@163.com。

收稿日期:2017-12-19

布;不同气候带之间的 C : N 相对于 C : P 和 N : P 更加稳定。江叶枫等^[12]研究江西省耕地的表层土样,发现土壤 N : P 高值区分布在相对低海拔或鄱阳湖平原地区,低值区主要分布于九江市,并认为空间变异主要受到氮肥施用的影响。综上所述,土壤碳氮磷生态化学计量特征的空间变异性受到多种因素的影响。

目前,关于土壤碳氮磷生态化学计量特征空间变异性的报道较多^[10-13],但有关岩溶地区土壤生态化学计量的研究相对有限,特别是岩溶区与非岩溶区之间的对比研究更是鲜见报道。岩溶区生态环境脆弱、容量小,土壤地球化学元素组成特殊,以及石漠化现象普遍,这迫切需要探明土壤中碳氮磷等植被生长必需元素的时空分布和迁移机制。因此,本文选取来自 1 : 25 万云南省广南县幅土壤地球化学调查中的 102 个表层组合土样和 24 个深层组合土样数据,利用单因素方差分析、多重比较法以及地统计学方法对岩溶区与非岩溶区之间的土壤碳氮磷生态化学计量特征及其空间变异进行比较分析,从而探讨导致这种空间

变异的可能影响因素,以期为生态环境治理和土壤修复提供科学依据。

1 研究区概况

研究区在 1 : 25 万云南省广南县图幅区域范围内,位于广南县东北部,与广西壮族自治区西林县接壤。研究区的地理坐标为 E105°00′ ~ 105°15′, N24°00′ ~ 24°10′,总面积为 402.91 km²,其中岩溶区占 197.52 km²,非岩溶区占 205.39 km²(图 1)。广南县属于中亚热带高原季风气候区,年平均降雨量为 1 056.5 mm,年平均气温为 16.7 °C,无霜期达 305 d,年平均日照时间为 1 875.7 h,冬无严寒,夏无酷暑。广南县幅内海拔为 971~1 701 m,以山地为主,西南部和北部海拔相对较低,中部 NW—SE 向山岭连绵,地势较高;土壤以黄紫泥土、酸性母岩红壤、酸性母岩黄红壤以及棕泥土为主;土地利用类型主要为有林地、灌木林地和旱地。

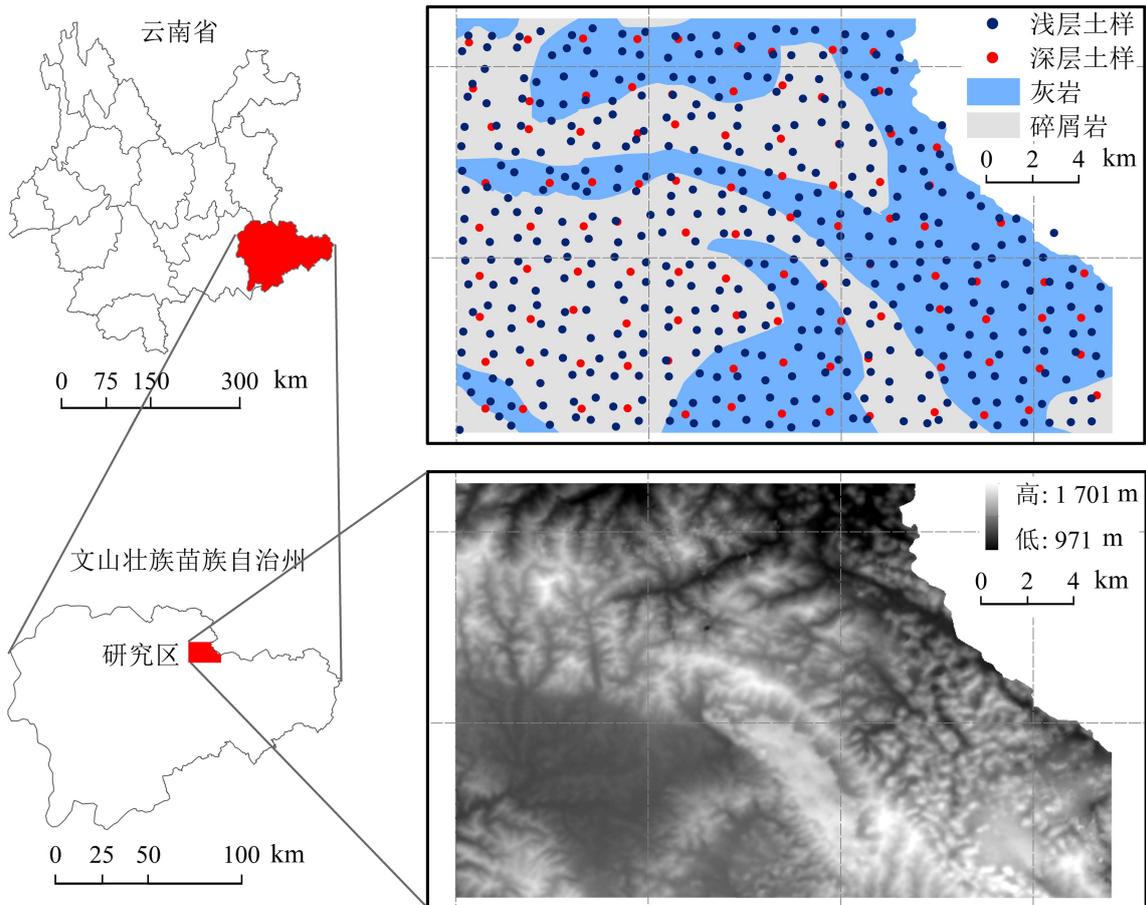


图 1 研究区位置、海拔及采样点分布情况

Fig. 1 Location, elevation of the study area and the distribution of sampling points

2 研究方法

2.1 样品采集与处理

2016 年 7—9 月,按照《多目标区域地球化学调查规范(1:25 万)》(以下简称《规范》)进行土壤样品网格布点和采集。样点布设以代表性为主要原则,分布于网格内的主要土地利用类型区,且兼顾土壤易于汇集区。表层土壤样品(0~20 cm)的采集密度为每平方千米 1 个点,每个点由 1 个主样点和 2 个分样点组成,分样点距离主样点 30~50 m。采样时首先去除表面枯枝落叶等杂物,然后均匀垂直采集地表及以下 20 cm 深的土壤,共采集表层样点 406 个。深层土壤样品(>100 cm)的采集密度为每 4 平方千米 1 个点。在进行深层土壤样品采集时,考虑到岩溶区是可溶性岩石受地表水和地下水的长期作用所形成的特殊地貌形态区,成土速率缓慢,土壤侵蚀速率快,土壤厚度较薄,所以规定岩溶区采样深度为 100 cm 以下,而非岩溶区采样深度为 150 cm 以下,自下而上连续采集直径约为 5 cm、长度为 50 cm 的土柱,共采集深层样点 96 个。野外采样过程中需要使用 GPS(佳明 GPS 72H)西安 80 坐标系对各主样点进行定点。室内样品前处理过程中首先对土壤样品进行干燥、粉碎,并过 20 目筛,然后将表层土壤样品按 4 km² 大格、深层土壤样品按 16 km² 大格分别进行分析样品组合,最后组合出 102 个表层土壤分析样品和 24 个深层土壤分析样品。

2016 年 12 月对每个分析样品进行各指标测定。各项指标的检出限严格参照《规范》,每 50 个分析样品中插入 4 个标样(分析国家一级标准物质)和 1 个重复样,以确保样品分析结果的准确度和精密性。

2.2 数据分析

本研究中的 C:N、C:P 和 N:P 均为质量比。利用 Excel 对原始数据处理分析得到 SOC、TN 和 TP 及 C:N、C:P 和 N:P;利用 SPSS 22.0 进行单因素方差分析(one-way ANOVA);利用 Levene 法进行方差齐性检验,其中方差齐性和方差非齐性分别采用 Duncan 法和 Tamhane's T₂ 检验进行多重比较分析;采用普通克里格插值法对 SOC、TN、TP、C:N、C:P 和 N:P 进行空间插值;利用 GS+ 9.0 分析获得半方差函数模型;利用 ArcGIS 10.2 获得空间分布图。

空间插值的精度检验采用交叉验证方法中的留

一交叉验证(Leave-one-out)^[14]。空间插值精度通过 3 个指标进行评估:(1)平均误差(ME),反映预测值和实测值估计误差的大小;(2)均方根误差(RMSE),反映预测值和实测值的离散程度;(3)标准化均方根误差(NRMSE),如果 NRMSE 接近 1,则预测标准误差有效,如果 NRMSE 大于 1,说明对预测中的变化性估算不足,NRMSE 小于 1,说明对预测中的变化性估算过高。计算公式如下^[15]:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i) \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (2)$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(\hat{y}_i - y_i) / \hat{\sigma}_i]^2} \quad (3)$$

式中: n 是检验样本大小; \hat{y}_i 是预测值; y_i 是实测值; $\hat{\sigma}_i$ 是 i 处的方差平方根。

3 结果与分析

3.1 土壤碳氮磷含量及其生态化学计量特征

岩溶区与非岩溶区土壤碳氮磷的描述性统计及含量对比分析如表 1 和图 2 所示,从中不难看出,广南县图幅内,岩溶区与非岩溶区表层土壤 SOC 含量相近,深层土壤 SOC 含量也相近,但远低于表层土壤。岩溶区和非岩溶区相同深度的土壤 TN 含量相近,但岩溶区略高于非岩溶区,深层土壤 TN 含量均远低于表层土壤。无论在岩溶区还是在非岩溶区,表层和深层土壤之间的 TP 含量相差不大,且无论是在表层还是深层,岩溶区土壤 TP 含量均远高于非岩溶区。

研究区土壤碳氮磷生态化学计量比值分析表明,在相同土壤深度下,岩溶区土壤 C:N、C:P 和 N:P 值均低于非岩溶区(表 2)。单因素方差分析结果表明,无论是岩溶区还是非岩溶区,表层土壤的 C:N、C:P 和 N:P 值均显著高于深层($p < 0.05$);岩溶区表层土壤 C:N、C:P 和 N:P 值均显著低于非岩溶区,深层土壤 C:N 和 C:P 值略低于非岩溶区,而 N:P 值显著低于非岩溶区(表 2)。与全国土壤碳氮磷生态化学计量比值特征相比,研究区 C:N、C:P、N:P 值在垂直方向上具有相似的变化趋势,但它们的均值都低于全国均值,特别是 C:P 值远低于全国均值。

表1 研究区土壤碳氮磷描述性统计特征

Table 1 Descriptive statistics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in the study area

			最小值/	最大值/	均值/	标准差	变异系数	偏度	峰度
			$g \cdot kg^{-1}$	$g \cdot kg^{-1}$	$g \cdot kg^{-1}$				
岩溶区	表层	SOC	9.7	34.3	17.8	4.7	0.3	1.2	0.3
		TN	1.0	4.3	2.0	0.6	0.3	1.7	0.3
		TP	0.5	2.3	1.2	0.5	0.4	0.6	0.3
	深层	SOC	1.7	9.2	4.6	2.4	0.5	0.6	0.7
		TN	0.5	1.3	0.8	0.2	0.3	0.7	0.7
		TP	0.6	3.1	1.4	0.8	0.6	1.2	0.7
非岩溶区	表层	SOC	10.0	30.5	18.1	5.1	0.3	0.7	0.3
		TN	1.0	2.8	1.8	0.4	0.2	0.7	0.3
		TP	0.4	1.8	0.7	0.3	0.4	2.8	0.3
	深层	SOC	1.7	8.7	3.7	2.1	0.6	1.6	0.6
		TN	0.4	1.0	0.7	0.2	0.3	0.6	0.6
		TP	0.3	1.0	0.5	0.2	0.4	0.8	0.6

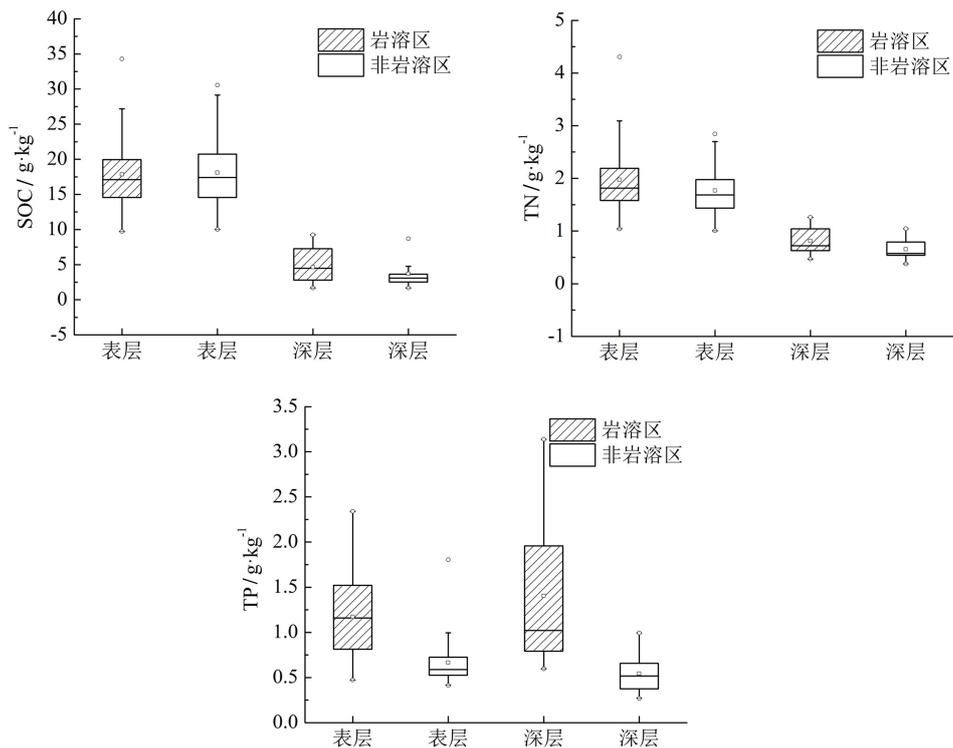


图2 岩溶区与非岩溶区土壤碳氮磷含量对比

Fig. 2 Comparison of carbon, nitrogen and phosphorus contents in the soil between the karst and non-karst areas

3.2 表层土壤碳氮磷的空间结构特征

利用GS+ 9.0拟合半方差函数,反映土壤碳氮磷的空间结构特征。广南县幅土壤SOC、TN、TP、C:N、C:P和N:P变异函数的理论模型以及反映空间异质性的参数如表3所示,其最佳拟合模型均

为指数模型,各模型的决定系数均很高(>0.82),说明拟合效果良好。TN、TP、C:N和N:P的块基比均小于0.25,表现为强烈的空间相关性,表明TN和TP的空间变异主要受结构性因素的影响,如土壤类型、气候、母质、地形等^[11],而受耕作、施肥、破坏以及

表 2 研究区土壤碳氮磷生态化学计量比值及其与全国土壤的比较(平均值±标准误差)

Table 2 Eco-stoichiometric ratios of the soil carbon, nitrogen, phosphorus in the study area and comparison with those in China (Average value ± Standard error)

区域	土壤深度类型	C : N	C : P	N : P
岩溶区	表层	9.2±0.2a	17.4±1.0a	1.9±0.1a
	深层	5.4±0.4b	3.7±0.5b	0.7±0.1b
	均值	8.5±0.2	15.0±1.1	1.7±0.1
非岩溶区	表层	10.3±0.2c	29.4±1.5c	2.9±0.1c
	深层	5.5±0.5b	6.9±0.7b	1.3±0.1d
	均值	9.3±0.3	24.8±1.6	2.5±0.1
全国 ^[16]	0~10 cm	14.4±0.4	136±11	9.3±0.7
	10~50 cm	12.3±0.1	74±1.3	6.1±0.2
	50~100 cm	11.2±0.1	46±1.4	4.2±0.1
	> 100 cm	11.5±1.0	29±2.3	2.7±0.1
	全部土层	11.9±0.1	61±0.9	5.2±0.1

注:同列不同小写字母表示各土壤类型间的化学计量比差异显著($p < 0.05$)。

表 3 研究区表层土壤碳氮磷含量和生态化学计量比的半方差变异函数模型和参数

Table 3 Semi-variance models and parameters of the surface soil carbon, nitrogen, phosphorus contents of the study area

指标	模型	块金值	基台值	块基比	变程/km	残差	决定系数(R ²)
SOC	指数	8.70	26.00	0.33	10.0	5.470	0.907
TN	指数	0.05	0.34	0.15	15.0	0.002	0.923
TP	指数	0.04	0.18	0.22	10.0	0.003	0.855
C : N	指数	0.23	2.40	0.10	9.0	0.076	0.903
C : P	指数	39.00	118.00	0.33	9.1	144.000	0.862
N : P	指数	0.15	0.87	0.17	7.0	0.038	0.828

抽样分析误差等随机性因素的影响较小^[11,16]。SOC 和 C : P 的块基比均为 0.33(>0.25),表现为中等强度的空间相关性,表明可能受到耕作施肥等人类活动的干扰。TN 的变程为 15 km,而其他指标的变程均不大于 10 km,表明前者具有相对强的空间自相关性。

3.3 表层土壤碳氮磷生态化学计量比的空间变异特征

根据 GS+ 9.0 拟合的模型及其参数,利用 ArcGIS 10.2 对广南县幅表层土壤 SOC、TN、TP、C : N、C : P 和 N : P 进行普通克里格空间插值,从而得到它们的空间分布(图 3)。从图 3 中可看出,研究区土壤 SOC、TN、TP 含量整体上具有西部低、东部高的空间分布特征。与之相比,C : N、C : P、N : P 的空间分布特征恰恰相反,即低值区集中于东部,高值区散布于西部。其中,C : P 和 N : P 的空间分布特征较为相似,它们分别有 4 个和 5 个高值中心散布于西部,主要位于非岩溶区;C : P 在空间分布上存在 3

个明显的低值中心,分别位于东部岩溶区(2 个)和北部岩溶区(1 个);N : P 在空间分布上存在 4 个明显的低值中心,分别位于东部岩溶区(3 个)和北部岩溶区域内(1 个)。而 C : N 在空间分布上有 3 个高值中心,分别位于研究区南部和中部,低值区散布于西北部、北部及东北部。

交叉验证结果显示(表 4),与 SOC、TN、TP、C : N、C : P 和 N : P 的实测值相比,其预测值的 ME, RMSE 均较小,且 NRMSE 都接近于 1,表明预测值和实测值相符合,即预测结果可靠。

3.4 不同土壤类型碳氮磷含量的空间变化

对研究区 102 个表层土壤样品的碳氮磷含量按不同土壤类型分别进行统计(表 5),不难发现研究区 4 种土壤类型按 SOC 均值大小依次为:黄紫泥土>酸性母岩红壤>棕泥土>酸性母岩黄红壤,TN 均值大小依次为:黄紫泥土>棕泥土>酸性母岩红壤>酸

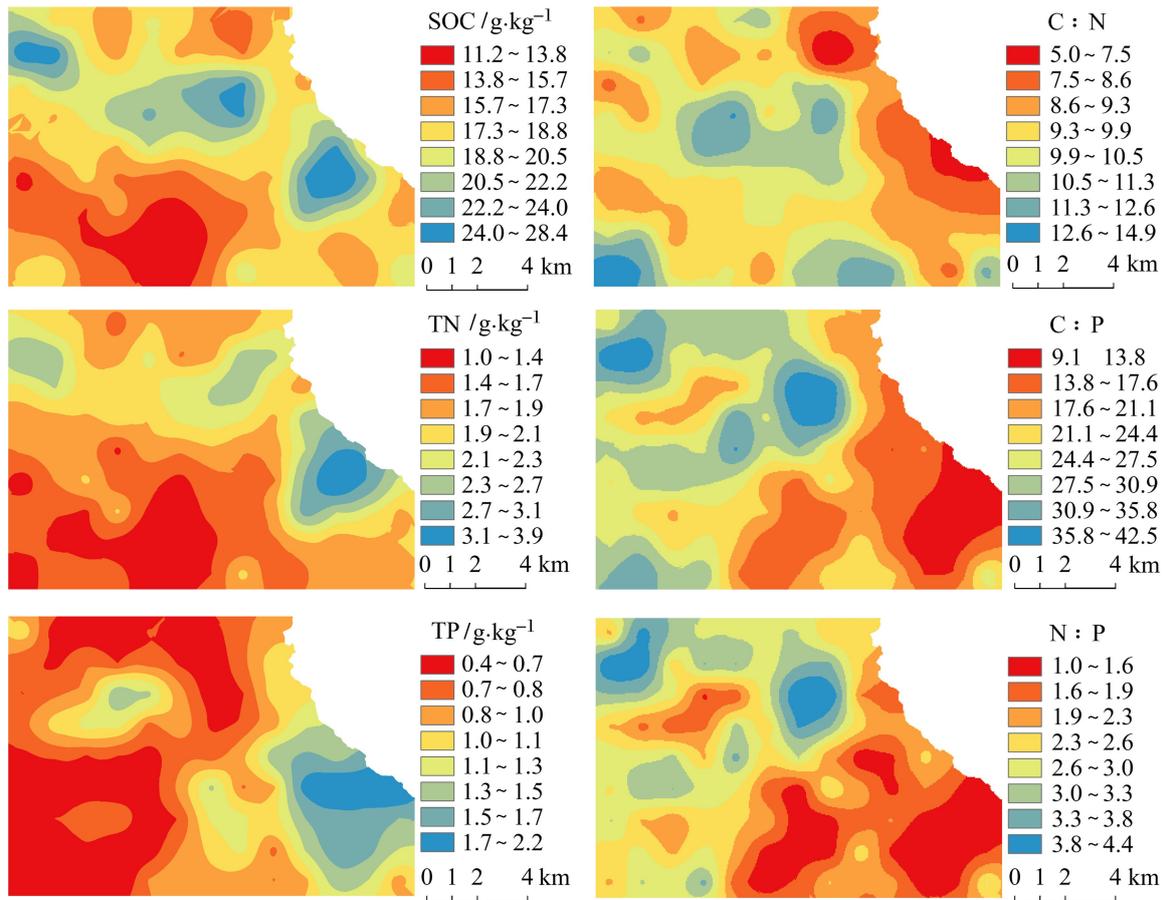


图3 普通克里格预测的表层土壤碳氮磷的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of carbon, nitrogen and phosphorus in surface soil predicted by ordinary kriging

表4 克里格插值的精度检验

Table 4 Accuracy test of kriging interpolation

指标	平均误差 (ME)	均方根误差 (RMSE)	标准均方根误差 (NRMSE)
SOC	0.000 8	4.176 6	0.980 7
TN	0.003 3	0.363 0	0.910 1
TP	0.001 3	0.313 2	0.943 3
C : N	-0.015 1	1.283 1	1.070 4
C : P	-0.040 9	9.210 2	0.994 6
N : P	-0.000 8	0.779 7	0.985 1

表5 不同土壤类型碳氮磷含量空间变化特征

Table 5 Spatial variation characteristics of carbon,nitrogen and phosphorus contents in different soil types

指标	土壤类型	最小/ g·kg ⁻¹	最大/ g·kg ⁻¹	均值/ g·kg ⁻¹	SD	CV
SOC	A	11.1	34.3	19.5	5.57	0.29
	B	12.9	30.5	19.3	4.50	0.23
	C	9.7	22.3	15.3	3.46	0.23
	D	11.8	20.7	16.8	3.25	0.19
TN	A	1.3	4.3	2.1	0.67	0.32
	B	1.2	2.8	1.9	0.38	0.20
	C	1.0	2.2	1.5	0.28	0.19
	D	1.6	2.7	2.0	0.39	0.20
TP	A	0.5	2.3	1.3	0.51	0.40
	B	0.4	1.8	0.8	0.35	0.44
	C	0.4	1.4	0.7	0.21	0.32
	D	0.6	0.8	1.2	0.21	0.25

注:A-黄紫泥土,B-酸性母岩红壤,C-酸性母岩黄红壤,D-棕泥土,SD-标准差,CV-变异系数。

性母岩黄红壤,TP均值大小依次为黄紫泥土>棕泥土>酸性母岩红壤>酸性母岩黄红壤。总之,黄紫泥土的碳氮磷含量最高,酸性母岩黄红壤的碳氮磷含量最低。4种土壤各指标的变异系数(CV)均在0.1~1.0之间,且每种土壤SOC和TN的变异系数均略低于TP,但都属于中等变异^[17],这表明不同土壤类型养分含量之间的差异可能是由成土过程的差异所导致的^[12]。

4 讨论

4.1 土壤碳氮磷生态化学计量特征及其相互关系

研究区土壤碳氮磷生态化学计量比研究表明,无论是岩溶区还是非岩溶区,表层土壤的 C : N、C : P 和 N : P 值均显著高于深层,与前人的研究结果基本一致^[18-21],这可能是由于土壤中碳氮主要来源于植被凋落物,其先在地表分解,而后向下迁移扩散,随着土壤深度的增加,碳氮的含量降低。而土壤中磷的凋落物分解补给较少,主要由母岩风化输入,且磷在土

壤中的迁移能力较弱^[22],因而表层与深层土壤中磷含量相差不大。对于相同深度的土壤,岩溶区 C : N、C : P 和 N : P 值均低于非岩溶区,这可能是由于岩溶区石灰土中较不活跃的胡敏酸在腐殖质中占比较大,与石灰土中的钙结合生成难以矿化分解的胡敏酸素,从而使得土壤氮磷含量高于非岩溶区^[23-24]。

岩溶区和非岩溶区不同深度土壤碳氮磷生态化学计量特征的相关性分析显示(图 4),无论是岩溶区还是非岩溶区,表层和深层土壤中 N : P 与 C : P 均呈显著的正相关,这是由于土壤中 SOC 与 TN 具有

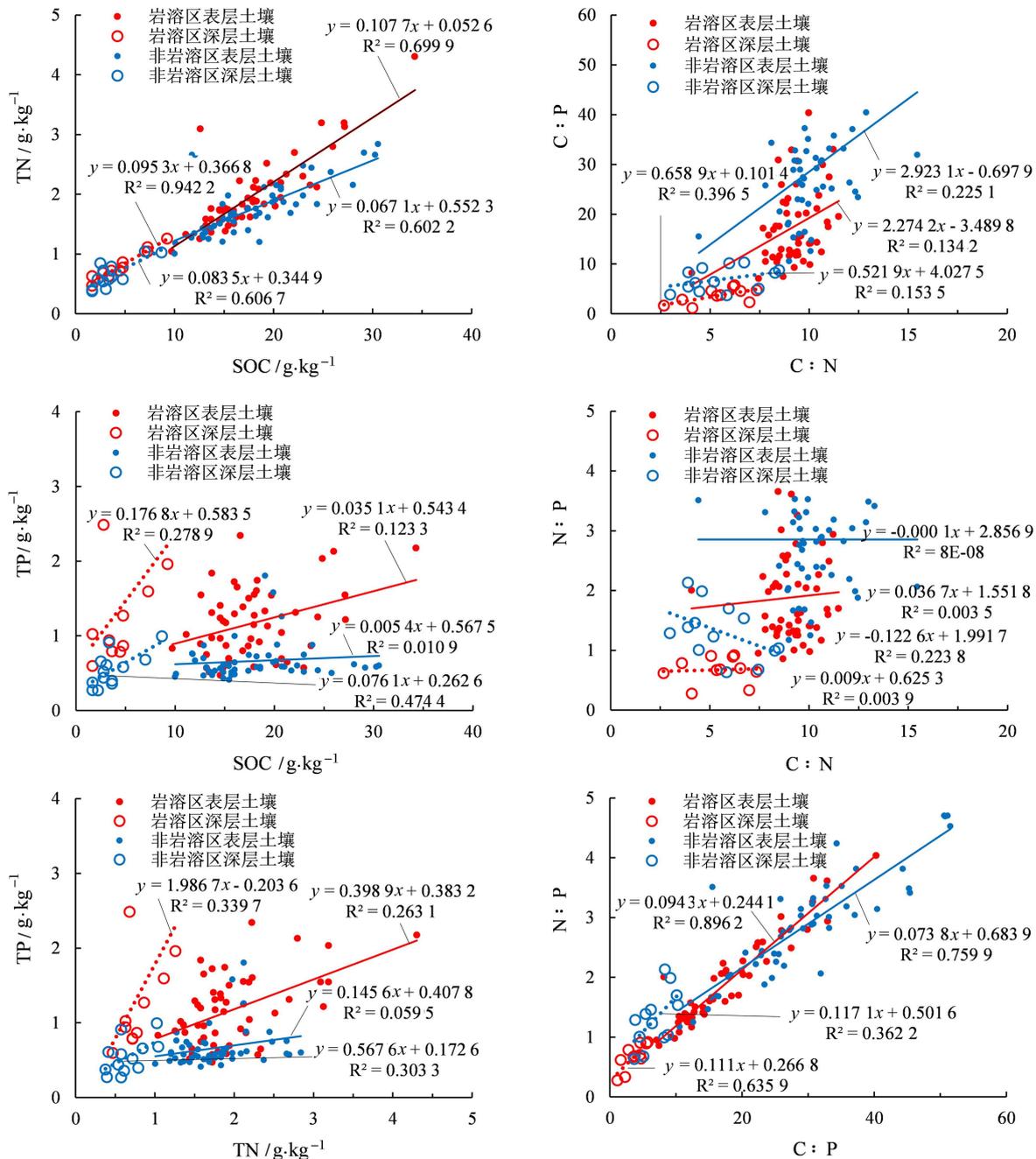


图 4 岩溶区与非岩溶区土壤碳氮磷生态化学计量特征的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of the soil carbon, nitrogen and phosphorus eco-stoichiometry in the karst and non-karst areas

明显的正相关关系,表明土壤中碳-氮循环可能存在协同演化过程。然而,C:P与C:N以及N:P与C:N均不具有明显的线性关系,这可能是由于磷在土壤中迁移过程缓慢,基本不受碳、氮含量变化的影响。

4.2 土壤碳氮磷生态化学计量比空间变异的影响因素

成土母质是土壤形成的物质基础,直接决定了土壤的形成过程和理化性质^[25]。岩溶区土壤的成土母质是碳酸盐岩,而非岩溶区的成土母质为碎屑岩,两者在成分、结构性质等方面的差异决定了其形成的土壤在养分含量、理化性质以及结构特征等方面存在巨大的差别。本文中相同深度的土壤,岩溶区土壤碳氮磷生态化学计量比均低于非岩溶区(表2),这表明土壤碳氮磷生态化学计量比空间变化受到成土母质的严重制约。

土壤类型是影响土壤碳氮磷空间变异的主要结构性因素之一。不同土壤类型具有不同理化性质,比如土壤的孔隙度、温度等物理性质对碳氮磷的含量具有明显的制约作用^[19];pH可通过改变地球化学环境来影响碳氮磷在土壤中的赋存形态和转化形式,也可以通过调节微生物的活性来影响碳氮磷循环过程;而盐度通过影响植物生长和微生物作用强度来影响营养元素的转化分解^[20]。另外,气候和地形主要是通过局部气温和降水的差异变化影响植物和微生物对营养元素的吸收或分解,进而导致土壤碳氮磷生态化学计量比的空间变异^[11, 26]。

土地利用变化是影响土壤碳氮磷空间变异的重要人为因素之一^[17, 27]。不同程度的人类活动干扰,如化肥的施用、生活污水的排放以及旅游污染等^[28],均有可能导致土地利用变化差异,从而对土壤碳氮磷的积累和再循环过程产生不同程度的影响^[29]。

5 结 论

(1)广南县幅岩溶区土壤SOC、TN、TP含量均显著高于非岩溶区,而C:N、C:P、N:P值均显著低于非岩溶区。无论是岩溶区还是非岩溶区,表层土壤SOC、TN、C:N、C:P、N:P均明显高于深层,而TP含量相差不大。

(2)研究区表层土壤中SOC、TN、TP含量整体上具有西低东高的空间分布特征,而C:N、C:P、N:P的低值区集中分布于东部,高值区散布于西部。这种空间变异主要受到成土母质和土壤类型等自然因素的制约,同时还受到土地利用变化等人为因素的影响。

参考文献

- [1] Sterner R W, Elser J J. Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere [M]. Princeton University Press, 2002: 225-226.
- [2] Urabe J, Sterner R W. Regulation of herbivore growth by the balance of light and nutrients [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1996, 93(16): 8465-8469.
- [3] Güsewell S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance [J]. New Phytologist, 2004, 164(2): 243-266.
- [4] Wang Y P, Law R M, Pak B. A global model of carbon, nitrogen and phosphorus cycles for the terrestrial biosphere [J]. Biogeosciences, 2010, 7(7): 9891-9944.
- [5] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 2-6.
- [6] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [7] Bui E N, Henderson B L. C:N:P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors [J]. Plant and soil, 2013, 373(1-2): 553-568.
- [8] Griffiths B S, Spillies A, Bonkowski M. C:N:P stoichiometry and nutrient limitation of the soil microbial biomass in a grazed grassland site under experimental P limitation or excess [J]. Ecological Processes, 2012, 1(1): 1-11.
- [9] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [10] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 等. 陕北黄土高原土壤性质及其生态化学计量的纬度变化特征[J]. 自然资源学报, 2015, 30(5): 870-879.
- [11] 曹祥会, 龙怀玉, 周脚根, 等. 中温-暖温带表土碳氮磷生态化学计量特征的空间变异性: 以河北省为例[J]. 生态学报, 2017, 37(18): 6053-6063.
- [12] 江叶枫, 叶英聪, 郭熙, 等. 江西省耕地土壤氮磷生态化学计量空间变异特征及其影响因素[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1527-1539.
- [13] 卢同平, 张文翔, 牛洁, 等. 典型自然带土壤氮磷化学计量空间分异特征及其驱动因素研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(3): 681-691.
- [14] 范永东. 模型选择中的交叉验证方法综述[D]. 太原: 山西大学, 2013.
- [15] 方学燕, 陈新军, 冯永玖, 等. 基于综合环境因子的协同克里金法分析茎柔鱼资源丰度空间分布[J]. 海洋学报, 2017, 39(2): 62-71.
- [16] 唐夫凯, 周金星, 崔明, 等. 典型岩溶区不同退耕还林地对土壤有机碳和氮素积累的影响[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(2): 44-50.
- [17] 雷志栋, 杨诗秀, 许志荣, 等. 土壤特性空间变异性初步研究[J]. 水利学报, 1985(9): 10-21.
- [18] Tian H, Chen G, Zhang C, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data [J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1-3): 139-151.
- [19] 张广帅, 邓浩俊, 杜锟, 等. 泥石流频发区山地不同海拔土壤生态化学计量特征: 以云南省小江流域为例[J]. 生态学报, 2016,

- 36(3): 675-687.
- [20] 张友,徐刚,高丽,等. 黄河三角洲新生湿地土壤碳氮磷分布及其生态化学计量学意义[J]. 地球与环境, 2016, 44(6): 441-450.
- [21] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4674-4682.
- [22] 中国科学院南京土壤研究所专刊: 土壤专报[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [23] 曾四满, 刘满强, 陈小云, 等. 岩溶区和碎屑岩区林地和农田土壤氮矿化过程对比研究[J]. 中国岩溶, 2016, 35(3): 269-273, 281.
- [24] 曹建华, 袁道先, 潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤[J]. 地球科学进展, 2003, 18(1): 37-44.
- [25] 李天杰, 赵焯, 张科利, 等. 土壤地理学(第三版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [26] 冯德枫, 包维楷. 土壤碳氮磷化学计量比时空格局及影响因素研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(2): 400-408.
- [27] 张蕊, 曹静娟, 郭瑞英, 等. 祁连山北坡亚高山草地退耕还林草混合植被对土壤碳氮磷的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(6): 938-944.
- [28] 张珍明, 林绍霞, 张清海, 等. 不同土地利用方式下草海高原湿地土壤碳、氮、磷分布特征[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 199-204.
- [29] 蔡运龙. 土地利用/土地覆被变化研究: 寻求新的综合途径[J]. 地理研究, 2001, 20(6): 645-652.

Spatial variation analysis of soil carbon, nitrogen and phosphorus eco-stoichiometric ratios in karst and non-karst areas of Guangnan county, Yunnan, China

GU Jiahui^{1,2}, YANG Qiyong², JIANG Zhongcheng², LUO Weiqun²,

ZENG Hongchun^{1,2}, QIN Xingming², LAN Funing²

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Ecosystem and Treatment of Rocky Desertification, MNR, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract The ratio of soil carbon, nitrogen and phosphorus is an important indicator of soil organic matter composition and quality. However, soil has a high degree of spatial heterogeneity. In karst areas, the composition of soil geochemical elements is special, the ecological environment is vulnerable, and the natural environment is significantly different from non-karst areas. Therefore, it is necessary to understand spatial and temporal distributions and the migration mechanism of essential elements, such as carbon, nitrogen and phosphorus, for vegetation growth in the soils of both karst areas and non-karst areas. The study area of current study is located in Guangnan county, Yunnan Province, where karst areas account for 197.52 km² and non-karst areas for 205.39 km². The soil composition data for 102 surface composite soil samples and 24 deep composite soil samples were obtained from the soil geochemical survey on the scale of 1:250,000. In this paper, one-way ANOVA, multiple comparison analysis and geostatistical method were utilized to compare the characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus eco-stoichiometry and spatial variability between karst areas and non-karst areas, so as to explore the possible factors leading to this spatial variability and provide a reliable basis for ecological environment management and soil remediation. The results showed that in general, the contents of soil organic carbon(SOC), total nitrogen(TN) and total phosphorus(TP) in the karst area were significantly higher than those in the non-karst area, while the carbon to nitrogen ratio(C:N), carbon to phosphorus ratio(C:P) and nitrogen to phosphorus ratio(N:P) were significantly lower than non-karst area. Whether in karst areas or in non-karst areas, the content of SOC, TN and the C:N, C:P, N:P ratio in the surface soil (0-20 cm) were significantly higher than those in the deep soil (>100 cm). Kriging interpolation results indicated that the contents of SOC, TN, TP in the surface soil were characterized by low in west and high in east of the study area; while the C:N, C:P, N:P had a spatial distribution pattern of low values concentrated in the east and high values scattered in the west. In addition, there were differences in nutrient contents among different soil types, with the highest content of SOC, TN and TP in yellow-purple-mud soil and the lowest content of them in acid yellow-red soil. Natural factors, such as pedogenic parent rocks and soil types, have seriously controlled spatial variation of the soil carbon, nitrogen and phosphorus. Meanwhile, anthropic factors, such as land use change, also play an important role, which can not be ignored.

Key words soil, eco-stoichiometric ratio, spatial variation, karst and non-karst areas, Guangnan

(编辑 黄晨晖)