

陕西省眉县猕猴桃园土壤碳氮磷 生态化学计量学特征

范拴喜

(宝鸡文理学院 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 陕西 宝鸡 721013)

摘要: 以眉县猕猴桃园土壤为研究对象, 对土壤 pH 值、含水率、有机碳(SOC)、总氮(TN)、总磷(TP)的分布及其生态化学计量学特征进行研究。结果表明: 研究区域猕猴桃园土壤含水率、pH 值、SOC、TN 和 TP 含量均存在显著性差异, 分别处于 1.12% ~ 3.46%、7.12 ~ 8.40、4.22 ~ 13.90 g·kg⁻¹、0.77 ~ 1.84 g·kg⁻¹ 和 0.73 ~ 2.45 g·kg⁻¹ 之间, 均值分别为 2.73%、7.83、7.66 g·kg⁻¹、1.20 g·kg⁻¹ 和 1.40 g·kg⁻¹, 其表现 C、N 元素相对匮乏, 而 P 元素相对丰富; 其次, 不同区域及不同品种园区土壤中 C、N 和 P 的生态化学计量学特征均存在显著性差异, C/N、C/P 和 N/P 的变异系数分别为 28.30%、35.71% 和 21.15%, 变化范围分别为 3.06 ~ 11.99、2.68 ~ 10.90 和 0.48 ~ 1.41, 均值分别为 6.57、5.91 和 0.90, 均低于全国平均水平; 相关分析表明, 在 0.05 水平上, pH 值与 C/P 呈显著正相关性; 在 0.01 水平上, pH 值与 TN、pH 值与 TP、TN 与 C/N、TN 与 C/P、TP 与 C/N、TP 与 C/P、TP 与 N/P 呈显著的负相关性, pH 值与 C/N、SOC 与 C/N、SOC 与 C/P、TN 与 TP、C/N 与 C/P 及 C/P 与 N/P 呈显著正相关性。

关键词: 猕猴桃园土壤; C; N; P; 生态化学计量学特征

中图分类号: S153.6⁺1 **文献标志码:** A

Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus within kiwi fruit orchards of Meixian County in Shaanxi

FAN Shuan-xi

(*Shaanxi Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulation, Baoji University of Arts
and Sciences, Baoji, Shaanxi 721013, China*)

Abstract: The objective of this study was to investigate the soil ecological stoichiometric characteristics of kiwi fruit orchards of Meixian County. The soil at different territories and kiwi fruit cultivars were selected to investigate the distribution patterns of moisture content, pH, soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN) and total phosphorous (TP), and to examine the ecological stoichiometric characteristics of C, N and P within the soil. The results showed that the moisture content, pH, SOC, TN and TP varied in different territories and different kiwi fruit cultivars, with ranges of 1.12% ~ 3.46%, 7.12 ~ 8.40, 4.22 ~ 13.90 g·kg⁻¹, 0.77 ~ 1.84 g·kg⁻¹ and 0.73 ~ 2.45 g·kg⁻¹, respectively. And the mean were 2.73%, 7.83, 7.66 g·kg⁻¹, 1.20 g·kg⁻¹ and 1.40 g·kg⁻¹, respectively, indicating that the elements of N and C were relatively scarce, and P was relatively rich. The soil ecological stoichiometric characteristics were significant difference in kiwi fruit orchards of Meixian County. The coefficients of variation of C/N, C/P and N/P were 28.30%, 35.71% and 21.15%, respectively, which were in the range of 3.06 ~ 11.99, 2.68 ~ 10.90 and 0.48 ~ 1.41, respectively. The mean of variation coefficients were 6.57, 5.91 and 0.90, respectively, all being below the national average. The correlation analyses revealed that the pH had highly significant positive correlation with C/P at 0.05 level; pH and TN, pH and TP, TN and C/N, TN and C/P, TP and C/N, TP and C/P, TP and N/P were all highly significant negative correlation at 0.01 level; pH and C/N, SOC and C/N, SOC and C/P, TN and TP, C/N and C/P, C/P and N/P were all highly significant positive correlation.

Keywords: soil of kiwi fruit orchards; C; N; P; ecological stoichiometric characteristics

收稿日期: 2016-06-20
基金项目: 陕西省教育厅自然科学项目(16JK1042); 陕西省地理学重点学科资助
作者简介: 范拴喜(1981—), 男, 陕西陇县人, 硕士, 副教授, 主要从事环境分析与评价研究。E-mail: fanshuanxi123@sina.com。

生态化学计量学是研究生物系统能量平衡和多重化学元素(主要是 C、N、P)平衡的学科^[1],其本质是元素含量与植物生长之间的化学计量学关系^[2],主要用来指导养分限制、养分循环及土壤与植物相互作用对 C、N、P 循环的关系^[3]。生态系统中 C 是动植物及微生物干物质的结构性物质, N 和 P 是影响其生长的限制性因子^[4], N、P 关键养分的改变会对生态系统碳循环的过程造成影响^[5-6], C/N 比和 C/P 比代表生物吸收营养元素时同化碳的能力,反映了生物对营养元素的利用效率^[7]。我国对生态化学计量学的研究起步较晚,但发展速度较快,主要集中在 C、N、P 的生态化学计量学特征、驱动因素、环境因子的耦合及其在不同系统、群落、物种间的差异等方面,近几年尤以草原、森林和湿地等生态系统为对象来研究植物的根茎叶、凋落物及叶片中的 C、N、P 的生态计量学特征较为突出,而对土壤中 C、N、P 的生态计量学特征研究较少。土壤中 C、N、P 含量的高低及组合状况不仅会受到母岩、地貌、气候、年代、植被、土壤动植物、物理结构、化学性质影响,也会受到人类活动的影响^[8-10], C、N、P 之间的比值是土壤有机碳与其总氮、总磷质量之比,是土壤中碳、氮、磷循环及土壤有机碳质量的重要指标,也是土壤内部 C、N、P 循环能力和土壤质量状况的重要指标^[11],并对土壤元素矿化或固持有重要的指示作用^[12]。开展土壤化学计量学特征研究,对揭示土壤养分的限制情况和 C、N、P 循环及平衡机制具有重要意义;同时对调控土壤肥力具有一定的指导作用,有助于认识土壤-植物-微生物相互作用的养分调控因素和辨别土壤养分动态平衡的阈值;亦可作为预测有机质分解速度的重要指标;而且通过对土壤 C、N、P 的化学计量学研究,可预测土壤生态系统中碳氮磷的平衡趋势,对评估区域土壤生态系统的碳汇潜力具有辅助作用^[13]。另外,研究土壤碳氮磷化学计量有助于评价生态系统过程中元素循环对全球气候变化的生态响应^[14-15]。

眉县是“中国优质猕猴桃之乡”,也是国家级猕猴桃标准化示范区,取得了农业部猕猴桃国家地理标志认证。截止 2014 年春,全县猕猴桃种植面积已达到 1.96 万公顷,约占耕地总面积的 83.5%,农户均种植猕猴桃 0.24 公顷,人均 0.063 公顷,已成为眉县经济的新亮点和农业发展的支柱产业。本文选取陕西省眉县猕猴桃种植园区为研究对象,对不同区域、不同品种以及不同树龄土壤中 C、N、P 化学计量学特征进行研究,旨在掌握研究区域土壤 C、N、P 化学计量学特征、养分情况,并探索 C、N、P 在不

同区域、不同品种以及不同树龄土壤中的协同趋势和响应特征,以及 C/N、C/P、N/P 与碳储量的联系,为眉县猕猴桃园区土壤科学管理,提高猕猴桃品质和产量提供科学依据,并为化学计量学研究提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

眉县隶属陕西省宝鸡市,地处东经 107°39′08″~108°00′51″,北纬 33°59′080″~34°19′28″,位于陕西省关中平原西部,太白山下,南依秦岭,北临渭水,属黄河中游川塬沟壑区。地形地貌由南向北依次为山区、浅山丘陵区、黄土台塬区、渭北平原区,坡面、台塬、川道、河谷等,地形地貌特征分明。眉县气候差异极其悬殊,既有平原气候和川原气候,还有浅山丘陵气候,更有山地垂直气候带,总体为暖温带大陆性半湿润气候。海拔高度在 442~3 767 m 之间,年平均气温 12.9℃,平均降水 609.5 mm,平均相对湿度为 71%,平均日照 2 015.2 h,光照热量充足。湿润的气候,充足的水源,温暖的气候是种植猕猴桃的理想场地。全县辖 8 镇 123 个行政村,总面积 863 km²,其中农耕地 2.48 万公顷,猕猴桃种植面积已达到 1.96 万公顷,主要分布在渭河以南的首善镇、金渠镇、横渠镇、汤峪镇、青化乡等 7 个乡镇,栽培品种主要有徐香、红阳、秦美及海沃德,另外搭配栽培的品种有黄金果、金香、华优、金魁、楚红等。

1.2 土样采集与处理

采样时间为 2015 年 2—4 月。采集区域分布眉县猕猴桃主要种植乡镇首善镇、金渠镇、汤峪镇、横渠镇、青化乡,其选取采样点数分别为 20、25、25、25、10 个,各区域根据栽植品种、面积、树龄综合考虑,选取能代表临近果园状况的园区作为具体的采样点位,每个采样位面积不小于 0.3 hm²,采集品种主要为徐香、秦美、红阳,树龄在 2、4、6、8 a 中选择,根据实际情况对不同品种和不同树龄果园土壤进行分类采集,采集深度为 0~20 cm 的表层土壤,各果园中按“S”型布点,避开施肥点,在离树干 1 m 左右的范围采集土样,每个果园以多点采集后混合作为一个样品,现场采用四分法缩至约 1 kg 后装入自封袋编号带回实验室。首善镇、金渠镇、汤峪镇、横渠镇、青化乡最终采集样品总数分别为 97、116、109、112、53 个。将采集的土样经自然风干,拣出石子和植物根系,碾碎后研细,使其全部通过 100 目筛,用“四分法”缩分,约剩余 200 g 编号装袋,实验待用。

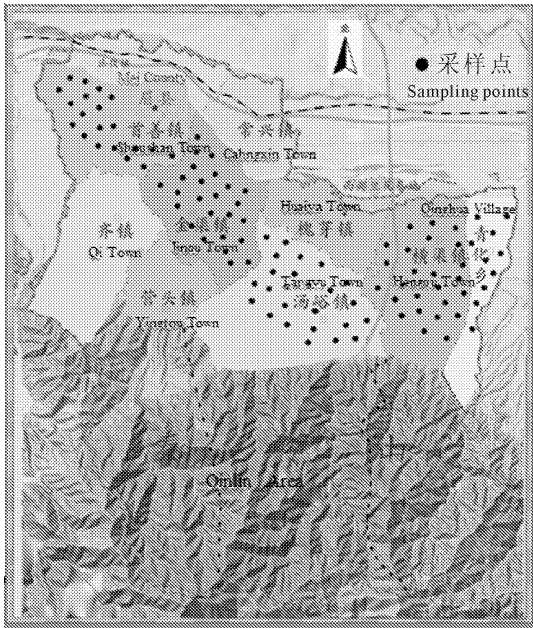


图 1 眉县猕猴桃园区土壤采样位置分布示意图

Fig.1 The diagrammatic sketches of soil the sampling location of kiwi fruit orchards in Meixian County

1.3 测定项目与方法

测定项目包括土壤 pH 值、有机碳(SOC)、总氮(TN)、总磷(TP),其中:土壤含水率和干物质测定依照重量法测定;pH 值采用笔式 pH 计测定;土壤有机碳采用重铬酸钾氧化-分光光度法测定;总氮和总磷采用连续流动分析仪(Flowsys III)的总氮和总磷模块分别进行测定。

数据分析以及图的制作采用 Excel 2003、Origin 7.5 及 SPSS 20 等软件进行。

1.4 主要设备及仪器

连续流动分析仪(厂家:SYSTEA 意大利;型号:

Flowsys III);控温式远红外消解炉(厂家:STP20;编号:13-020-02-02-675);笔式 pH 计(厂家:美国维赛;型号:YSI pH 10);调速多用振荡器(厂家:常州国华;编号:HY-2);电子天平(厂家:赛多斯科学仪器有限公司;编号:00000246)。

2 结果与分析

2.1 猕猴桃园土壤含水率、pH 值、有机碳、总氮及总磷的变化

由表 1 可知,眉县各采样乡镇猕猴桃园土壤 pH 值、SOC、TN 及 TP 的总体情况为:pH 值介于 7.12~8.40 之间,均值 7.83,属于中偏弱碱性土壤,变异系数金渠镇最大(5.44%),横渠镇最小(2.24%),总的变异系数为 4.60%;有机碳(SOC)介于 4.22~13.90 g·kg⁻¹之间,均值 7.66 g·kg⁻¹,变异系数汤峪镇最大(25.12%),青化乡最小(9.00%),平均变异系数为 23.12%;总氮(TN)介于 0.77~1.84 g·kg⁻¹之间,均值 1.20 g·kg⁻¹,变异系数青化乡最大(23.48%),横渠镇最小(12.26%),平均变异系数为 19.10%;总磷(TP)介于 0.73~2.45 g·kg⁻¹之间,均值 1.40 g·kg⁻¹,变异系数金渠镇最大(39.29%),青化乡最小(15.30%),平均变异系数为 29.94%。变异系数是用于衡量一组观测数据离散程度大小,即衡量观测值的变异程度的一个统计量,变异系数越大,说明观测指标具有较大的空间异质性,本研究显示眉县猕猴桃园土壤相应观测指标的整体空间变异性情况为 TP>SOC>TN>pH,总磷含量在水平空间上的变异较大,其次是有机碳,再是总氮,而 pH 值最小,对于同一指标,除青化乡 SOC 差异变异程度较小外,其余各乡镇之间有所差异,但差异性较小。

表 1 眉县猕猴桃园土样 pH 值、有机碳、总氮及总磷统计学特征

Table 1 The statistical characteristics of pH、SOC、total N and total P in kiwi fruit orchards soil of Meixian County

乡镇 Villages and towns	pH		有机碳 SOC		总氮 Total N		总磷 Total P	
	平均值 ± SD Mean ± SD /(g·kg ⁻¹)	CV/%	平均值 ± SD Mean ± SD /(g·kg ⁻¹)	CV/%	平均值 ± SD Mean ± SD /(g·kg ⁻¹)	CV/%	平均值 ± SD Mean ± SD /(g·kg ⁻¹)	CV/%
首善镇 Shoushan Town	7.95 ± 0.26	3.32	8.15 ± 2.03	24.91	1.16 ± 0.18	15.46	1.49 ± 0.31	20.83
金渠镇 Jinqu Town	7.91 ± 0.43	5.44	7.45 ± 1.59	21.34	1.22 ± 0.28	22.90	1.40 ± 0.55	39.29
汤峪镇 Tangyu Town	7.48 ± 0.27	3.61	7.08 ± 1.78	25.12	1.22 ± 0.18	14.72	1.19 ± 0.28	23.47
横渠镇 Hengqu Town	7.59 ± 0.17	2.24	8.14 ± 2.00	24.58	1.31 ± 0.16	12.26	1.51 ± 0.41	27.13
青化乡 Qinghua Village	7.90 ± 0.20	2.53	6.89 ± 0.62	9.00	1.11 ± 0.26	23.48	1.24 ± 0.19	15.30
平均值 Mean	7.83		7.66		1.20		1.40	
范围 Range	7.12 ~ 8.40		4.22 ~ 13.90		0.77 ~ 1.84		0.73 ~ 2.45	
CV/%	4.60		23.12		19.10		29.94	

2.2 猕猴桃园土壤碳氮磷生态化学计量学分布特征

由表 2 可知眉县各研究乡镇猕猴桃园土壤生态化学计量学整体分布情况为:C/N 变化范围为 3.06 ~ 11.99,均值为 6.57,各乡镇变异系数介于 24.81% ~ 43.41% 之间,横渠镇最大,平均变异值为 28.30%;C/P 变化范围为 2.68 ~ 10.90,均值为 5.91,各乡镇变异系数介于 16.98% ~ 41.57%,最大为金渠镇,平均为 35.71%;N/P 变化范围为 0.48 ~

1.41,均值为 0.90,变异系数介于 11.48% ~ 23.36%,最大为金渠镇,平均为 21.15%,由此可见:C/N、C/P 和 N/P 各指标之间表现出较大的空间变化,其整体变化趋势为:C/P > C/N > N/P;C/N、C/P 和 N/P 同一指标内部各乡镇也存在差异,但差异较小。

2.3 猕猴桃园土壤各目标因子间的相关性

对猕猴桃园土壤有机碳、全氮、全磷及其生态化学计量比的相关性分析,结果见表 3。

表 2 猕猴桃园土壤碳氮磷生态化学计量学分布特征
Table 2 Basic properties of soil in research areas

乡镇 Villages and towns	C/N		C/P		N/P	
	平均值 ± SD Mean ± SD	CV/%	平均值 ± SD Mean ± SD	CV/%	平均值 ± SD Mean ± SD	CV/%
首善镇 Shoushan Town	7.09 ± 1.76	24.81	5.65 ± 1.61	28.50	0.80 ± 0.13	16.27
金渠镇 Jinqu Town	6.39 ± 1.98	31.00	6.06 ± 2.52	41.57	0.94 ± 0.22	23.36
汤峪镇 Tangyu Town	6.03 ± 2.12	35.13	6.45 ± 2.64	40.92	1.05 ± 0.12	11.48
横渠镇 Hengqu Town	6.29 ± 2.73	43.41	5.71 ± 2.26	39.58	0.90 ± 0.17	18.89
青化乡 Qinghua Village	6.58 ± 1.79	27.22	5.65 ± 0.96	16.98	0.80 ± 0.11	12.78
平均值 Mean	6.57		5.91		0.90	
范围 Range	3.06 ~ 11.99		2.68 ~ 10.90		0.48 ~ 1.41	
CV/%	28.30		35.71		21.15	

表 3 猕猴桃园土壤各肥力指标之间的相关性
Table 3 Correlation between pH、SOC、TN、TP、C/N、C/P and N/P

	pH	SOC	TN	TP	C/N	C/P	N/P
pH	1.000	-0.067	-0.692**	-0.370**	0.347**	0.246*	-0.003
SOC		1.000	-0.010	0.061	0.748**	0.576**	-0.074
TN			1.000	0.660**	-0.631**	-0.532**	-0.154
TP				1.000	-0.360**	-0.741**	-0.789**
C/N					1.000	0.788**	0.023
C/P						1.000	0.574**
N/P							1.000

注: * 在 0.05 水平上显著相关, ** 在 0.01 水平上显著相关;TN—总氮,TP—总磷。
Note: * were significantly correlated at 0.05 level, ** were significantly correlated at 0.01 level; TN—total N, TP—total P.

由表 3 得出:pH 值与 C/P 在 0.05 水平上具有显著的正相关性;pH 值与 TN、pH 值与 TP、TN 与 C/N、TN 与 C/P、TP 与 C/N、TP 与 C/P、TP 与 N/P 在 0.01 水平上具有显著的负相关性;pH 值与 C/N、SOC 与 C/N、SOC 与 C/P、TN 与 TP、C/N 与 C/P 及 C/P 与 N/P 在 0.01 水平上具有显著的正相关性。

3 讨 论

通过对眉县猕猴桃园 0 ~ 20 cm 土壤 pH 值、SOC、TN、TP、C/N、C/P 及 N/P 等研究,其结果显示:眉县猕猴桃园土壤为中偏弱碱性土壤。该研究区域内土壤 C、N、P 平均含量(有机碳平均含量为 7.66

g·kg⁻¹,总氮为 1.20 g·kg⁻¹,总磷为 1.40 g·kg⁻¹)与全国土壤 C、N、P 平均含量(全国土壤 C、N、P 平均含量^[16]分别为 19.33、1.61、0.75 g·kg⁻¹)相比,C、N 含量明显低于全国水平,P 含量高于全国水平,说明研究区域土壤 C、N 元素相对匮乏,而 P 元素相对丰富。C、N、P 各指标之间和同一指标各乡镇之间其变异系数存在较大的差异和波动,这是缘于土壤中碳素、氮素和磷的总量受土壤母岩、地质、地貌、气候、植被、土壤动植物等成土因子和物理结构、化学性质以及种植户的管理措施、耕作方式、施肥种类及量等影响因素所导致,C、N、P 总量空间变异性较大,其导致了 C/N、C/P、N/P 的空间变异性较大。

本研究所得眉县猕猴桃园土壤 C/N 的平均值为 6.57, 低于全球土壤 C/N (全球 C/N 平均值为 13.33^[17]), 也低于中国土壤 C/N 平均值 (中国土壤 C/N 在 10~12 之间, 平均值为 11.9^[18-20])。在土壤中, 其 C/N 与土壤有效 N 的关系为: 当 C/N > 30, 同化固 N 量 > 矿化释 N 量, 其差值即为土壤有效 N 的固定量; 当 15 < C/N < 30, 同化固 N 量和矿化释 N 量基本保持平衡, 即有效氮的产消平衡; 当 C/N < 15, 矿化释 N 量 > 同化固 N 量, 其差值就是土壤有效 N 的供应量。由此可知, 本研究中矿化释出的有效 N 量较多。一般, 土壤 C/N 与有机质分解速度呈反比^[21], 即: 土壤 C/N 比低, 其意味着土壤中有有机质矿化或者分解速度较快, 而有机质矿化或者分解速度过快则不利于土壤肥力的维持; 土壤 C/N 越高, 越不利于有机质分解^[22], 原因是低 C/N 可以加快微生物的分解作用和氮的矿化速率, 而高 C/N 对土壤微生物的活动能力有一定的限制作用^[23]。本研究中, 土壤 C/N 低, 说明本研究区土壤中有利于微生物对有机质矿化, 且速度较快, 释放出有效 N 量相对较多, 但过量的有效 N 会流失而降低其利用率和造成环境污染, 同时矿化速度过快也不利于土壤肥力的维持。另外, 有研究^[24]表明, 土壤有机层 C/N 大于 30 或者小于 30 分别是硝酸盐淋溶风险低或者高的阈值, 由此可见, 本研究中 C/N 小于 30, 说明本研究区域土壤中硝酸盐淋溶风险较高。

土壤 C/P 是土壤磷素矿化能力的标志^[25], 本研究中眉县猕猴桃园土壤 C/P 平均值为 5.91, 已有研究表明, 微生物量 C/P 一般在 7~30 之间变化, 故本研究区域土壤 C/P 较低。C/P 高低会对植物的生长发育有重要影响, C/P 小则说明微生物在矿化土壤有机物中释放磷的潜力较大, 磷的有效性较高, 其利于微生物在有机质分解和矿化过程中养分的释放, 促进土壤中有效磷的增加, 故 C/P 低是磷有效性高的一个指标; 反之, C/P 较高, 会使土壤微生物在分解有机质的过程中受到磷的限制, 有利于土壤有机碳库的积累, 但会使土壤微生物与植物存在对无机磷的竞争, 不利于植物的生长^[26]。本研究中 C/P 低, 表明了研究区域中土壤中磷的有效性较高, 有利于其上植物的生长, 但不利于土壤有机碳库的积累。

土壤中的 N 和 P 是限制植物生长的重要元素, 也是植物赖以生存的物质基础和环境条件。土壤 N/P 的变化可能影响植物体内 N/P 的变化, N 和 P 是最重要的陆地生态系统植被限制性元素, 土壤 N/P 的变化是植物体 N/P 变化的基础, 土壤 N/P 可作为养分限制类型的有效指标^[27]。土壤中 N/P 的变化也会影响菌根共生体的固氮量和非菌根共生体,

在陆地生态系统中, 生物固氮量与土壤中 N/P 呈反比关系。本研究中眉县猕猴桃园土壤 N/P 平均值为 0.90, 低于全国平均值 2.15^[28], 有利于土壤中微生物的固氮作用。

本研究中, C/P、N/P 值低于全国水平, 一方面是因为研究区土壤 P 含量较为丰富, 另一方面由于落叶较少、土壤微生物的分解作用低、施肥及管理方式不当等原因造成土壤中 C、N 含量相对偏低, 故致使 C/P、N/P 的值偏低。

4 结 论

1) 眉县猕猴桃园耕层土壤 pH 均值为 7.83, 属中偏弱碱性土壤, 平均含水率 2.73%, 有机碳、总 N、总 P 平均含量分别为: 7.66、1.20、1.40 g·kg⁻¹, 其中 C、N 含量低于全国水平, 而 P 含量高于全国水平, 即 C、N 元素相对匮乏, 而 P 元素相对丰富。

2) 眉县猕猴桃园耕层土壤生态化学计量学 C/N、C/P、N/P 比的平均值分别为: 6.57、5.91、0.90, 其值均低于全国平均值。生态化学计量学 C/N、C/P 及 N/P 的变异系数分别为 28.30%、35.71% 和 21.15%, 表现出较大的空间变化, 其变化趋势为: C/P > C/N > N/P。

3) 相关性分析结果表明: pH 值与 C/P 在 0.05 水平上具有显著的正相关性; pH 值与 TN、pH 值与 TP、TN 与 C/N、TN 与 C/P、TP 与 C/N、TP 与 C/P、TP 与 N/P 在 0.01 水平上具有显著的负相关性; pH 值与 C/N、SOC 与 C/N、SOC 与 C/P、TN 与 TP、C/N 与 C/P 及 C/P 与 N/P 在 0.01 水平上具有显著的正相关性。

参 考 文 献:

- [1] 曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 等. 生态化学计量学特征及其应用研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5484-5492.
- [2] 邢 伟, 吴昊平, 史 俏, 等. 生态化学计量学理论的应用、完善与扩展[J]. 生态科学, 2015, 34(1): 190-197.
- [3] 张立华, 陈小兵. 盐碱地怪柳“盐岛”与“肥岛”效应及其碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 653-658.
- [4] 李 玮, 郑子成, 李廷轩. 不同植茶年限土壤团聚体碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 9-16.
- [5] Lai R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [6] Elser J J, Fagan W F, Kerkhoff A J, et al. Biological stoichiometry of plant production: metabolism, scaling and ecological response to global change[J]. New Phytologist, 2010, 186(3): 593-608.
- [7] 俞月凤, 彭晚霞, 宋同清, 等. 喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 947-954.
- [8] 李从娟, 徐新文, 孙永强, 等. 不同生境下三种荒漠植物叶片及

- 土壤 C、N、P 的化学计量特征[J]. 干旱区地理, 2014, 37(5): 996-1004.
- [9] McGroddy M E, Daufresne T, Hedin L O. Scaling of C:N:P stoichiometry in forests worldwide: implications of terrestrial redfield-type ratios[J]. *Ecology*, 2004, 85(9): 2390-2401.
- [10] 王维奇, 徐玲琳, 曾从盛, 等. 河口湿地植物活体-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7119-7124.
- [11] 程 滨, 赵永军, 张文广, 等. 生态化学计量学研究进展[J]. 生态学报, 2010, 30(6): 1628-1637.
- [12] Dise N, Galloway J, Gauci V, et al. Predicting dissolved inorganic nitrogen leaching in European forests using two independent databases[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(5): 1798-1808.
- [13] 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.
- [14] Goudie A S, Viles H A. Weathering and the global carbon cycle: Geomorphological perspectives[J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 113(1): 59-71.
- [15] Sinsabaugh R L, Manzoni S, Moorhead D L, et al. Carbon use efficiency of microbial communities: Stoichiometry, methodology and modeling[J]. *Ecology Letters*, 2013, 16(2): 930-939.
- [16] 韩 华, 王昊彬, 余华光, 等. 崇明滩涂湿地不同盐度梯度下芦苇种群及土壤的生态化学计量学特征[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(5): 816-823.
- [17] Post W M, Pastor J, Zinke P J, et al. Global patterns of soil nitrogen storage[J]. *Nature*, 1985, 317: 613-616.
- [18] 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.
- [19] Aitkenhead J, McDowell W. Soil C/N ratio as a predictor of annual riverine DOC flux at local and global scales[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(1): 127-138.
- [20] 王维奇, 全 川, 贾瑞霞, 等. 不同淹水频率下湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 238-242.
- [21] Chapin III F S, Matson P P A. Principles of terrestrial ecosystem [J]. *ecology Springer*, 2011, 16(2): 930-939.
- [22] 许 泉, 芮雯奕, 刘家龙, 等. 我国农田土壤碳氮耦合特征的区域差异[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(3): 57-60.
- [23] 甘卓亭, 张蓓蓓, 张掌权, 等. 渭北塬区不同龄苹果园土壤微生物空间分布特征[J]. 生态学报, 2015, 35(21): 6965-6973.
- [24] Gunderson P, Callesen I, de Vries W. Nitrate leaching in forest ecosystems is controlled by forest floor C/N ratio[J]. *Environ-Mental Pollution*, 1998, 102: 403-407.
- [25] 王建林, 钟志明, 王忠红, 等. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳磷比的分布特征[J]. 草业学报, 2014, 23(2): 9-19.
- [26] 彭佩钦, 张文菊, 童成立, 等. 洞庭湖湿地土壤碳、氮、磷及其与土壤物理性状的关系[J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1872-1878.
- [27] 王 行. 暖化湿地土-水界面碳磷耦合迁移特征及微生物生态学响应—微宇宙研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [28] 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.

(上接第 14 页)

- [3] 黄晓菊, 李小云. 生态系统中铅的迁移转化特征[J]. 光谱实验室, 2012, 29(4): 2222-2225.
- [4] 温明霞, 高焕梅, 石孝均. 长期施肥对作物铜、铅、铬、镉含量的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 119-122.
- [5] 陈智博, 陈宏伟, 朱蕴兰. 铅对土壤微生物生物量和酶活性的影响[J]. 高师理科学刊, 1999, 19(3): 47-50.
- [6] 朱红梅, 李国华, 崔 静, 等. 重金属铅对土壤微生物活性的影响[J]. 南京农业大学学报, 2011, 34(6): 125-128.
- [7] 李志鹏. 土地利用变化和重金属污染对水稻土壤呼吸和有机碳损失的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [8] 类成霞, 陈长青, 蒋 霁, 等. 水稻品种和砷污染对土壤溶解性有机碳氮的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 157-164.
- [9] 朱 江, 周 俊, 费群燕, 等. 外源铅在土壤中的形态、分布及其对土壤养分的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 74-77, 82.
- [10] 徐明岗, 吴 曼, 武海雯, 等. 土壤外源铅的稳定化特征及其对土壤性质的响应[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(9): 1702-1709.
- [11] Chaudhuri D, Tripathy S, Veeresh H, et al. Relationship of chemical fractions of heavy metals with microbial and enzyme activities in sludge and ash-amended acid lateritic soil from India[J]. *Environmental Geology*, 2003, 45(1): 115-123.
- [12] Pan J, Yu L. Effects of Cd or/and Pb on soil enzyme activities and microbial community structure[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(11): 1889-1894.
- [13] 曾路生, 廖 敏, 黄昌勇, 等. 外源铅对水稻土微生物量、微生物活性及水稻生长的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(3): 993-998.
- [14] 谢正苗, 卡里德, 黄昌勇, 等. 镉铅锌污染对红壤中微生物生物量碳氮磷的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(1): 69-74.
- [15] 高焕梅, 孙 燕, 和林涛. 重金属污染对土壤微生物种群数量及活性的影响[J]. 江西农业学报, 2007, 19(8): 83-85.
- [16] 张智猛, 戴良香, 张电学, 等. 冬小麦—夏玉米轮作周期内碱解氮、硝态氮时空变化及施氮安全值的研究[J]. 土壤通报, 2004, 35(1): 38-42.
- [17] 王碧玲, 谢正苗, 李 静, 等. 氯和磷对土壤中水溶-可交换态铅的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(6): 1724-1728.
- [18] 熊明彪, 雷孝章, 田应兵, 等. 钾离子在土壤中吸附和解吸动力学研究进展[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 115-118.
- [19] 彭 浩, 张兴昌, 邵明安. 雨强对黄土区土壤钾素径流流失的影响[J]. 生态环境, 2004, 13(3): 369-372.
- [20] 彭 浩, 张兴昌, 邵明安. 黄土区土壤钾素径流流失试验研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 70-73.
- [21] Dumat C, Quenea K, Bermond A, et al. Study of the trace metal ion influence on the turnover of soil organic matter in cultivated contaminated soils[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 142(3): 521-529.