

横断山北部生态脆弱区土壤磷素空间分布特征

欧勇胜, 张世熔*, 余 琼, 李 婷, 舒建英, 李 娟

(四川农业大学资源环境学院; 四川省土地信息重点实验室, 四川雅安 625014)

摘要:根据 90 个样点表层(0~20cm)土壤磷素的化验数据,在 ArcGIS8.1 平台上运用地统计学方法研究了横断山北部土壤磷素的空间分布特征及其影响因素。结果表明,该区土壤全磷和速效磷含量均属中上水平,全磷含量达 $1.20 \pm 0.66 \text{ g kg}^{-1}$,速效磷含量达 $13.7 \pm 12.6 \text{ mg kg}^{-1}$ 。土壤全磷空间分布总体上呈团状或块状,高值区($1.8 \sim 2.8 \text{ g kg}^{-1}$)主要分布于雅砻江流域西岸甘孜、新龙段和金沙江白玉、巴塘段之间的区域,并向西北和东南方向逐渐减少,低值区($< 0.7 \text{ g kg}^{-1}$)则主要分布于稻城县南部以及莫拉山以南德格以北的一个狭长区域;速效磷空间分布总体上呈小团块状,高值区($28 \sim 55 \text{ mg kg}^{-1}$)主要分布于雅砻江中游的甘孜县东部和西部,并向西北和正南方向逐渐减少,低值区($< 12 \text{ mg kg}^{-1}$)则主要分布于研究区东南部和南部边缘。成土母质本身含磷量和风化程度的不同使得磷素空间分布存在一定的水平、垂直分布特征。土地利用方式、海拔和坡度通过气候差异或土壤侵蚀程度来影响磷素含量。

关键词:全磷; 速效磷; 普通克立格; 空间分布; 影响因素

文章编号:1000-0933(2005)10-2776-06 中图分类号:S153.6,S154.1 文献标识码:A

Spatial distribution characteristics of the soil phosphorus in the ecological fragile area in the north of Hengduan Mountains

OU Yong-Sheng, ZHANG Shi-Rong*, YU Qiong, LI Ting, SHU Jian-Ying, LI Juan (College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Key Laboratory of Land Information in Sichuan Province, Yaan 625014, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(10): 2776~2781.

Abstract: Phosphorus plays an important role in the course of plant growth, and is a key factor that influences crop output and so is an important index to evaluate soil fertility. Furthermore, it can contribute to nonpoint source pollution of surface waters. Many researches indicated that parent material and fertilization quantity were the two primary factors to determine soil phosphorus content. There had been many researches on the spatial distribution regarding soil phosphorus content and it's influencing factors in recent years, most of them focused on parent material, landform, land use, and soil erosion, but few researches for altitude, slope gradient. There were few large-scale researches for spatial distribution of soil phosphorus content, too. The study area is mainly located in the north of Hengduan Mountains and is a typical ecological fragile area in China, with the most complicated and converse landform. Analyzing the spatial distribution characteristics and influencing factors of soil phosphorus content by the software ArcGIS8.1 is an effective approach to enhancing soil fertility and preventing the ecological environment from being destroyed. The objective of this research was to provide an approach of making rational use of soil resources and reconstructing an ecological fragile environment in the area. Using stratified sampling method, 90 sample points in topsoil(0~20cm) were selected. The results showed that the average content of soil total phosphorus (STP) and soil available phosphorus (SAP) were $1.20 \pm 0.66 \text{ g kg}^{-1}$ and $13.7 \pm 12.6 \text{ mg kg}^{-1}$, respectively. Based on the criteria for the classification of STP content which was set down during the second soil survey in the 1980s, the percentages of grade I ($> 1.0 \text{ g kg}^{-1}$), II ($0.8 \sim 1.0 \text{ g kg}^{-1}$), III ($0.6 \sim 0.8 \text{ g kg}^{-1}$) and IV ($0.4 \sim 0.6 \text{ g kg}^{-1}$) were 83.52%, 11.97%, 4.36% and 0.15%,

基金项目:四川省教育厅资助项目(01LA02)

收稿日期:2004-05-29;修订日期:2005-01-08

作者简介:欧勇胜(1979~),男,重庆大足人,硕士生,主要从事 3S 技术在资源环境中的应用

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail:zsr01@263.net

Foundation item: Project Supported by Education Committee of Sichuan Province(No. 01LA02)

Received date: 2004-05-29; Accepted date: 2005-01-08

Biography: OU Yong-Sheng, Master, mainly engaged in application of 3S in the resources and environment.

respectively. According to the criteria for the classification of SAP content, the percentages of grade I ($>40\text{mg kg}^{-1}$), II ($20\sim40\text{mg kg}^{-1}$), III ($10\sim20\text{mg kg}^{-1}$), IV ($5\sim10\text{mg kg}^{-1}$) and V ($<5\text{mg kg}^{-1}$) were 0.84%, 31.92%, 64.08%, 3.01% and 0.15%, correspondingly. The spatial distribution of STP mainly appeared as droplets. The highest value region ($1.5\sim2.8\text{g kg}^{-1}$) mainly existed in the west bank (between the segment of Ganzi, Xinlong and Baiyu, Batang) of Yalong River, and reduced towards the northwest and the south. The lowest value region ($0.2\sim0.9\text{g kg}^{-1}$) mainly existed in a long and narrow area which was in the south of Daocheng County, the south slope of Mola Mountain and the north of Dege County. The spatial distribution of SAP on the whole appeared as small droplets. The highest value region ($28\sim55\text{mg kg}^{-1}$) mainly existed in the east and west of Ganzi County which is located in the middle reaches of Yalong River, and declined towards the northwest and south. The lowest value region ($1\sim12\text{mg kg}^{-1}$) mainly lay to the southeast and south verge of the area. According to the analysis results of sample points, the STP content which derived from different parent material follows a pattern of: residual and slope deposit of schist (1.81g kg^{-1}) $>$ residual and slope deposit of limestone (1.71g kg^{-1}) $>$ alluvial deposit (1.40g kg^{-1}) $>$ diluvial deposit (1.26g kg^{-1}) $>$ residual and slope deposit of granite (1.21g kg^{-1}) $>$ residual and slope deposit of slate (1.15g kg^{-1}). The SAP content which derived from different parent material follows the order of: alluvial deposit (23.0mg kg^{-1}) $>$ residual and slope deposit of limestone (16.8mg kg^{-1}) $>$ residual and slope deposit of slate (14.1mg kg^{-1}) $>$ diluvial deposit (13.8mg kg^{-1}) $>$ residual and slope deposit of schist (3.9mg kg^{-1}) $>$ residual and slope deposit of granite (3.7mg kg^{-1}). Soil phosphorus content has a close relation to parent material, but a degree of weathering or nutrient release also influences it. In the north of Hengduan Mountains, the dominant agricultural land use types are grassland, forest land and cropland except the land which has not been used and water area, and the three land use types accounted for 61.72%, 27.10% and 0.62% of the area, respectively. The SAP content in cropland is highest among the three land use types because of a small quantity of rainfall, high air temperature and use of phosphatic fertilizer. Because landform has impacted on the distribution of parent material and hydrothermal condition, the spatial distribution of soil phosphorus content appears to some extent as horizontal distribution and hypsometric characteristics. STP and SAP content increased along with increase in altitude, which represents hypsometric characteristics to a certain extent. Because soil erosion intensity and soil nutrient translocation were different in different range of slope gradient, SAP content increased along with augment of slope gradient, but STP didn't change substantially along with the change of slope gradient.

Key words:total phosphorus; available phosphorus; ordinary kriging; spatial distribution; influencing factors

横断山北部地处我国第 1 个地貌台阶和第 2 个地貌台阶的过渡地带,是我国地理环境最为独特和生物多样性最为丰富的地区之一^[1]。早在 20 世纪 70 年代至 90 年代中期的 20 余年里,森林过度采伐、草场超载以及陡坡垦殖不仅造成区内水土流失严重、生态环境破碎化和生物多样性降低,而且由于泥沙淤塞和水体污染而危及三峡工程和长江中下游地区的安全,成为我国政府最为关注的生态脆弱区之一。该区土壤磷素含量的高低不仅影响生态环境重建中林草地植被的恢复,而且对于区内大渡河、雅砻江和金沙江三条河流水体富营养化作用^[2]有着重要的影响。

迄今关于磷素空间分布特征的研究主要集中于农田尺度和中小区域尺度方面,而大区域尺度的研究较少^[3]。多数研究者认为成土母质、地貌^[4,5]、土地利用方式^[6~8]和土壤侵蚀^[9~12]是影响土壤磷素分布的主要因素。但对于地质构造复杂,高差悬殊,成土母质繁多的横断山北部区域,其土壤磷素含量及影响因素是否与其他区域相似以及有无其特殊性问题等是值得探讨的内容。本文试图在 GPS 和 GIS 技术支持下,采用地统计学方法从区域宏观角度上研究横断山北部土壤磷素含量水平、空间分布特征及其影响因素,为该区土壤资源的合理利用和生态恢复与重建提供参考。

1 研究区域概况和研究方法

1.1 研究区域概况

横断山北部主要位于四川省甘孜州境内,地理位置为东经 $97^{\circ}21'\sim102^{\circ}38'$,北纬 $28^{\circ}05'\sim34^{\circ}21'$,幅员面积 15.3万 km^2 。全区地势由西北向东南逐渐降低,地形复杂。在德格、甘孜一线以北以丘原地貌为主;在该线以南,则以高山峡谷区为主。自北向南,大雪山和沙鲁里山绵延近千里;自西向东,金沙江、雅砻江和大渡河流贯全境。区内存在较明显的区域气候差异,以白玉、新龙和丹巴一线为界,北部地区属高原温带或亚寒带气候,年均温 7.8°C ,年降水量 $500\sim800\text{mm}$;南部地区属山地亚热带与暖温带气候,年均温 $12\sim20^{\circ}\text{C}$,年降水量 $700\sim1000\text{mm}$ 。区内成土母质类型丰富,主要有花岗岩、砂岩、千枚岩和片岩残坡积物及少量的河流冲积物。植被从低海拔的干热河谷到高海拔的湿冷山顶随水热状况的变化依次分布有常绿阔叶林、针阔混交林、山地针叶林、高山草甸带、高寒灌丛草甸带、高原沼泽和流石滩植被带。土壤类型随海拔高度增加依次主要分布着复钙筒育干润淋溶

土、普通筒育湿润淋溶土、冷凉常湿锥形土和钙积草毡寒冻锥形土。整个研究区除水域和未利用土地之外,农用地利用类型以草地、林地和耕地为主,分别占土地总面积的 61.72%、27.10% 和 0.62%。

1.2 土壤样品采集与化学分析

土样样点的设计根据区内气候、成土母质、地貌、植被以及土壤类型分布等资料按随机分层抽样原则进行,在 1:20 万地形图上概略确定采样点位置。野外采样根据实地情况调整后,用 GPS(*Etrex*)定位读取采样点坐标;为增加土样的代表性,每个样点在同一地块内随机采集 3 个土样混合组成待测样品,共计 90 个待测土壤样品(图 1)。其中呈微酸性的土样 12 个,呈中性或石灰性的土样 78 个。土壤全磷(STP)采用 NaOH 熔融,钼锑抗比色法测定;速效磷(SAP)采用 0.5mol L⁻¹NaHCO₃ 法浸提,钼锑抗比色法测定。

1.3 空间分析

利用 ArcGIS 8.1 中的地统计学组件计算土壤磷素含量的变异函数值,并按球状模型进行拟合,区域土壤全磷和速效磷的等值线图根据变异函数的参数值,用普通克里格法(Ordinary Kriging)内插获得。

2 结果与分析

2.1 土壤磷素基本统计特征分析

常规统计结果表明,全磷和速效磷含量均较为丰富(表 1)。研究区 90 个土壤样点表层全磷和速效磷为非正态分布,二者平均含量分别为(1.20±0.66)g kg⁻¹和(13.7±12.63)mg kg⁻¹;变异系数分别为 55.00%和 92.05%,表明全磷和速效磷含量相对于其均值离散程度较高。根据横断山北部 20 世纪 80 年代第 2 次土壤普查的磷素含量分级标准,该区土壤表层全磷含量为 I 级

(>1.0g kg⁻¹)、II 级(0.8~1.0g kg⁻¹)、III 级(0.6~0.8g kg⁻¹)和 IV 级(0.4~0.6g kg⁻¹)的土壤面积分别占全区土壤总面积的 83.52%、11.97%、4.36%和 0.15%,土壤速效磷含量为 I 级(>40mg kg⁻¹)、II 级(20~40mg kg⁻¹)、III 级(10~20mg kg⁻¹)、IV 级(5~10mg kg⁻¹)和 V 级(<5mg kg⁻¹)的土壤面积分别占全区土壤总面积的 0.84%、31.92%、64.08%、3.01%和 0.15%。

表 1 表层土壤磷素含量描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of phosphorus content in topsoil									
项目 Items	样点数量 Sampling No.	分布类型 Distribution type	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	标准差 Std. Dev.	变异系数 (%) C. V.	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
			STP (g kg ⁻¹)		SAP (mg kg ⁻¹)				
STP	90	非正态 ^①	0.24	2.82	1.20	0.66	55.00	0.759	-0.188
SAP	90	非正态	0.9	54.5	13.7	12.63	92.05	1.594	2.159

①Abnormal distribution

将土壤磷素含量按研究区主要土壤类型进行统计,干润冲积新成土全磷和速效磷平均含量最高,分别达到 2.48g kg⁻¹和 36.2mg kg⁻¹,以花岗岩、石灰岩等岩类坡积物、河流冲积物、老黄土和新近沉积的黄土物质以及石灰岩发育的红色风化壳为主要成土母质的复钙筒育干润淋溶土全磷平均含量最低,为 1.22g kg⁻¹,以砂板岩和花岗岩残积-坡积物以及石灰岩和玄武岩发育的红色风化壳为主要母质的普通筒育湿润淋溶土速效磷最低,仅为 4.0mg kg⁻¹。从总体上看,全磷含量为干润冲积新成土>冷凉常湿锥形土>普通筒育湿润淋溶土>钙积草毡寒冻锥形土>复钙筒育干润淋溶土;速效磷含量为干润冲积新成土>钙积草毡寒冻锥形土>复钙筒育干润淋溶土>冷凉常湿锥形土>普通筒育湿润淋溶土(表 2)。

2.2 土壤磷素地统计学分析

表 1 的描述性统计分析说明了土壤磷素的含量特征,但不能很好地反映整个研究区磷素含量的空间分布特征,即不能完全反映土壤磷素含量的空间结构性和随机性,运用地统计学方法可以较好地弥补上述缺陷。本文采用 ArcGIS8.1 的地统计学组

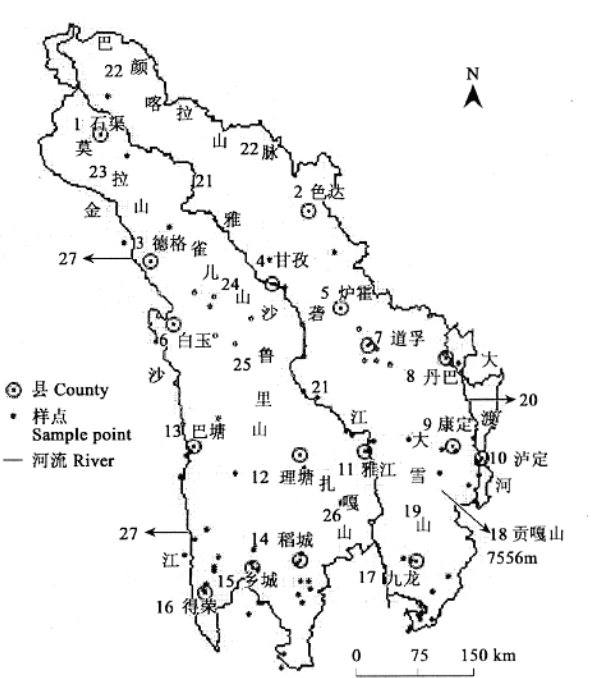


图 1 采样点分布图

Fig. 1 Distribution map of smple points

1. Shiqu; 2. Seda; 3. Dege; 4. Ganzi; 5. Luhuo; 6. Baiyu; 7. Daofu; 8. Danba; 9. Kangding; 10. Luding; 11. Yajiang; 12. Litang; 13. Batang; 14. Daocheng; 15. Xiangcheng; 16. Derong; 17. Jiulong; 18. Gonggashan Mountain; 19. Daxueshan Mountain; 20. Dadu River; 21. Yalong River; 22. Bayankalashan Mountains; 23. Molashan Mountain; 24. Que'ershan Mountain; 25. Shalulishan Mountain; 26. Zagashan Mountain; 27. Jinsha River

件计算不同间距的半方差,选择球状模型进行套合获得土壤磷素的各项参数(表3)。结果表明,全磷和速效磷的变程相差不大,分别为14.94km和16.76km。全磷空间变异中随机变异与结构性变异所占比例分别为38.40%和62.60%;速效磷空间变异则主要受结构性因素的影响^[13],而随机因素对其含量空间变异的影响很小。

表2 不同土壤类型中磷素含量统计

Table 2 Phosphorus content in different soil types					
项目 Items	干润冲积新成土 Ust-Alluvic Entisols	复钙筒育干润淋溶土 Rec-Hap-Ustic Luvisols	普通筒育湿润淋溶土 Typ-Hap-Udic Luvisols	冷凉常湿维形土 Bor-Perudic Cambisols	钙积草毡寒冻维形土 Cal-Mat-Cryic Cambisols
STP (g kg ⁻¹)	2.48	1.22	1.60	1.82	1.58
SAP (mg kg ⁻¹)	36.2	11.7	4.0	4.6	15.5

2.3 土壤磷素空间分布

根据以上获得的半方差理论模型,在 ArcGIS8.1 平台上采用普通克里格法进行最优内插分别获得全磷和速效磷含量的空间分布等值线图(图2)。图2a表明,研究区土壤全磷含量总体上呈条带状或块状分布。其中高值区(1.8~2.8g kg⁻¹)主要分布于雅砻江流域甘孜、新龙段和金沙江白玉、巴塘段之间呈北东—南西向倾斜的区域,即雀儿山以南沙鲁里山西坡部分地区,并向西北和东南方向逐渐减少;低值区(<0.7g kg⁻¹)主要分布于稻城南部的以及莫拉山以南德格以北的一个狭长区域。

图2b表明,土壤速效磷含量总体上呈小团块状分布,其空间分布较全磷复杂。全区速效磷含量高(>20mg kg⁻¹)、中等(20~10 mg kg⁻¹)和低(<10 mg kg⁻¹)的面积分别占土地总面积的30.64%、66.20%和3.16%。高值区(28~55mg kg⁻¹)主要分布在地处雅砻江中游的甘孜县东部和西部,并向西北和正南方向减少。低值区(<12mg kg⁻¹)主要分布于研究区南部边缘,自稻城经扎嘎山直至雅砻江下游西岸,以及巴塘东南部、德荣和理塘西部。

比较图2a和图2b可知,全磷和速效磷高值区主要分布区地理位置大体一致,均是在研究区中部区域雀儿山以南、沙鲁里山一带,并以窄条状向北延伸。

表3 表层土壤磷素变异函数理论模型及参数

Table 3 Theoretical model and corresponding parameters of phosphorus in topsoil

项目 Items	模型 Model	块金值 Nugget	基台值 Partial sill	块金值/基台值 Nugget/ Sill(%)	变程 Range (km)
STP	球状 Spherical	0.1490	0.3669	38.40	14.94
SAP	球状 Spherical	0.0000	1.3509	0.00	16.76

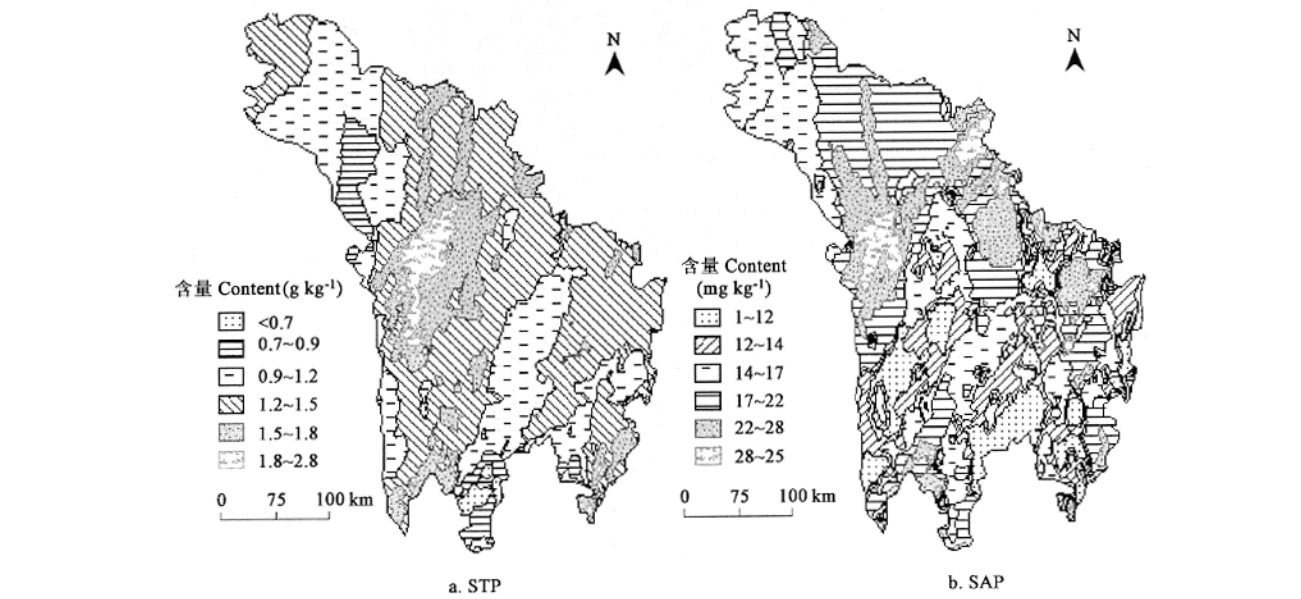


图2 土壤全磷和有效磷空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution map of STP and SAP

2.4 土壤磷素含量影响因素分析

研究区地质地貌复杂,影响土壤磷素含量的因素较多,本文仅就成土母质、土地利用方式、海拔和坡度对磷素含量的影响进

行探讨。

2.4.1 成土母质 不同母质形成的土壤,其磷素含量存在一定差异(图3)。区内西部从石渠南部到得荣边缘部分成土母质主要为花岗岩、砂岩和钙质板岩的残坡积物;从德格至乡城部分主要为板岩和花岗岩的残坡积物;其余部分主要分布砂岩残坡积物,河流两岸和沟谷中下部的成土母质主要为第四系冲积物和洪积物。统计结果表明,不同成土母质发育的土壤全磷含量为片岩残坡积物(1.81g kg^{-1})>石灰岩残坡积物(1.71g kg^{-1})>冲积物(1.40g kg^{-1})>洪积物(1.26g kg^{-1})>花岗岩残坡积物(1.21g kg^{-1})>板岩残坡积物(1.15g kg^{-1});由冲积物发育而来的土壤速效磷含量最高,花岗岩残坡积物发育的土壤最低,依次为冲积物(23.0mg kg^{-1})>石灰岩残坡积物(16.8mg kg^{-1})>板岩残坡积物(14.1mg kg^{-1})>洪积物(13.8mg kg^{-1})>片岩残坡积物(3.9mg kg^{-1})>花岗岩残坡积物(3.7mg kg^{-1})。由片岩残坡积物和花岗岩残坡积物发育而来的土壤全磷和速效磷含量水平均处于V级水平,这与其风化不彻底和养分释放不完全有关。

2.4.2 土地利用方式 除水域和未利用土地外,本区土地利用方式主要为林地、草地和耕地。在这3种土地利用方式中(图4),全磷含量为草地(1.44g kg^{-1})>林地(1.22g kg^{-1})>耕地(1.20g kg^{-1}),速效磷含量为耕地(15.7mg kg^{-1})>林地(11.6mg kg^{-1})>草地(9.7mg kg^{-1})。牧民的过渡放牧是造成草地速效磷含量偏低的主要原因,因此可考虑在天然草地实行休牧或轮牧制度,以促进草地生产力的逐渐恢复;耕地速效磷含量较草地和林地高,这是因为耕地主要集中分布在各低海拔干热河谷地区,年降水量偏少(约 761.6mm),土壤侵蚀程度较轻,再加上施肥等人为因素的影响而使得土壤速效磷含量较高。

2.4.3 海拔 由于横断山区北部气候条件、磷素淋失状况和植被分布均随海拔高度变化而变化,从而使得土壤磷素分布较复杂,但也表现出一定的垂直分布特征(图5)。除海拔在 $1000\sim 2000\text{m}$ 的干热河谷全磷含量较高外,从 2000m 到 5000m ,全磷含量随海拔的增高而增加,速效磷含量总体上随海拔的增高而增加。在海拔约 1100m 、 2500m 、 3400m 、 4200m 以上的干热河谷地带、干温河谷地带、干凉河谷地带和丘状高原,年平均降水量分别约为 761.6mm 、 474.4mm 、 636.0mm 和 569.0mm 。由于低海拔($1000\sim 2000\text{m}$)的干热河谷地带气温较高,植物表聚作用强烈,且地形平坦,磷素淋失程度较低而磷素含量较高;随海拔升高,气温降低,植物表聚作用趋于缓和,但地形较低海拔地区陡峭,土壤淋失程度较之剧烈而磷素含量减少;在研究区西北部的高海拔丘原地区属高寒地域($\geq 10^\circ\text{C}$ 积温仅 79.3°C),植物表聚作用较低海拔的干热(温)河谷地带($\geq 10^\circ\text{C}$ 积温达 $5300\sim 7400^\circ\text{C}$)弱,但降水量少,且地形平坦,磷素随水土流失带走的量低而含量高。

2.4.4 坡度 研究区多高山峡谷,山体陡峭,坡度变化大。由于土壤侵蚀程度的不同而使得土壤磷素含量在各坡度范围内存在较大差异(图6)。统计结果表明,分布在坡度 40° 以上的土壤全磷含量最高,分布在坡度 $20\sim 30^\circ$ 坡度范围的土壤次之,而分布在 $10\sim 20^\circ$ 和 $30\sim 40^\circ$ 范围内的土壤全磷含量相差不大;速效磷含量总体上随坡度的降低而增加,在 $10\sim 20^\circ$ 坡度范围达最大值。

3 结论和讨论

(1)研究结果表明,该地区磷素含量总体上较为丰富,仅巴塘和稻城以南少部分地区磷素较为缺乏。成土母质、土地利用方式、海拔和坡度与磷素含量关系密切。本区土地资源的利用要避免过渡放牧而导致草地土壤质量降低,继续搞好退耕还林还草工程和天然林保护工程,促进林、草地生产力持续上升,防止生态脆弱化程度进一步加剧以及因水土流失和土壤养分运移而导致下游水体的富营养化。所以,在本区这样一个特殊的自然生态环境中,注意人类自身的行为对于生态环境的恢复与改善是至

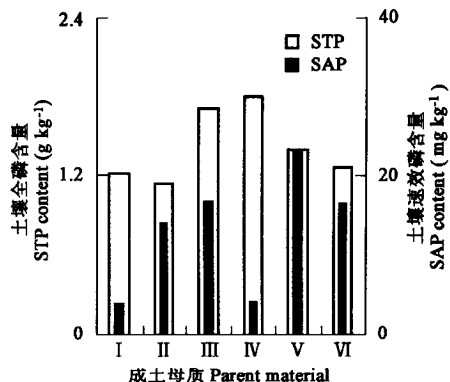


图3 成土母质与土壤磷素含量

Fig. 3 The relationship between parent material and soil phosphorus content

I. 花岗岩残坡积物 Residual and e deposit of granite; II. 板岩残坡积物 Residual and slope deposit of slate; III. 石灰岩残坡积物 Residual and slope deposit of limestone; IV. 片岩残坡积物 Residual and slope deposit of schist; V. 冲积物 Alluvial deposit; VI. 洪积物 Diluvial deposits

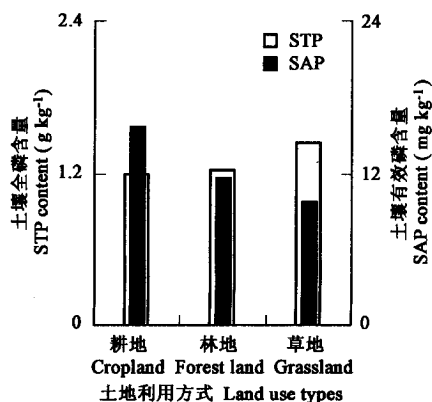


图4 土地利用方式与土壤磷素含量

Fig. 4 The relationship between land use types and soil phosphorus content

关重要的。

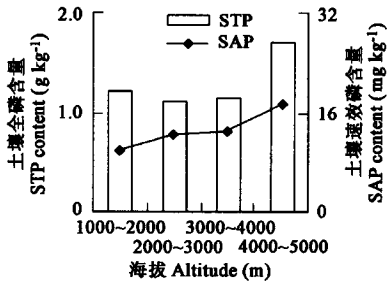


图5 海拔与土壤磷素含量

Fig. 5 The relationship between altitude and soil phosphorus content

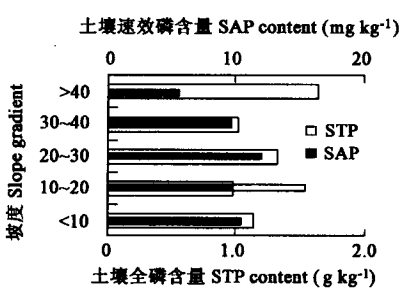


图6 坡度与土壤磷素含量

Fig. 6 the relationship between slope gradient and soil phosphorus content

(2)本次研究区域面积较大,交通条件差,且是我国地质地貌最为复杂的区域之一。在这种大尺度研究中,鉴于自然条件的限制,土壤采样具有一定程度的随机性。因此,如何利用3S技术以及如何设计样点才能以较小的人力物力投入,且能客观地反映土壤磷素空间分布的总体特征,是值得进一步探讨的问题。

References:

[1] Gao Y X, Li M S. *Soil in Hengduan Mountains*. Beijing: Scientific Press, 2000. 1~14.

[2] Sun G, Sheng L X. Ecological engineering for eutrophication control in lake. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, **12**(4): 590~592.

[3] Birr A S and Mulla D J. Evaluation of the Phosphorus Index in Watersheds at the Regional Scale. *J. Environ. Qual*, 2001, **30**: 2018~2025.

[4] Achim D, Thomas G and Niels T. Phosphorus Fertilizer Effects on Soil Phosphorus Pools in Acid Upland Soils. *Soil Sci.*, 2002, **66**: 652~660.

[5] Christopher B C and Connie C. Forms and Amounts of Soil Nitrogen and Phosphorus Across a Longleaf Pine—Depressional Wetland Landscape. *SSSAJ*, 2002, **66**: 1713~1721.

[6] Pei H K. Discussion on soil organic phosphorus type and content in different grassland types. *Soil*, 2002, **34**(1): 47~50.

[7] Griffin T S, Honeycutt C W and He Z. Changes in Soil Phosphorus from Manure Application. *SSSAJ*, 2003, **67**: 645~653.

[8] Chen X, Wang Z Q, Yang W D. Effects of slopping land use patterns on phosphorus loss in a micro—watershed of red soil red area, southern China. *Acta Ecological Sinica*, 2000, **20**(3): 374~378.

[9] Wang B Q, Liu G B. Effects of relief on soil nutrient losses in slopping fields in hilly region of loess plateau. *Journal of Soil Erosion and Water Conservation*, 1999, **5**(2): 18~22.

[10] Andrew N S, Richard W M, Jennifer L W, et al. Assessing Site Vulnerability to Phosphorus Loss in an Agricultural Watershed. *J. Environ. Qual.*, 2001, **30**: 2026~2036.

[11] John N Q, John A C and Hess M T. The Selective Removal of Phosphorus from Soil: Is Event Size Important? *J. Environ. Qual.*, 2001, **30**: 538~545.

[12] Li Y Y, Shao M A. Effects of phosphorus application methods on phosphorus loss on slopping land under simulated rainfall. *Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(11): 1421~1424.

[13] Guo X D. Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics combined with GIS—a case study in Zunhua city of Hebei Province. *Journal of Applied Ecology*, 2000, **11**(4): 557~563.

参考文献:

[1] 李明森.土壤形成的自然地理背景和人为影响.见:高以信,李明森主编.横断山区土壤.北京:科学出版社,2000.1~14.

[2] 孙刚,盛连喜.湖泊富营养化治理的生态工程.应用生态学报,2001,12(4):590~592.

[6] 裴海.不同草甸植被类型下土壤有机磷类型及含量探讨.土壤,2002,34(1):47~50.

[8] 陈欣,王兆孝,杨武德.红壤小流域坡地不同利用方式对土壤磷素流失的影响.生态学报,2000,20(3):374~378.

[9] 王百群,刘国彬.黄土丘陵区对坡地土壤养分流失的影响.土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(2):18~22.

[12] 李裕元,邵明安.模拟降雨条件下施肥方法对坡面磷素流失的影响.应用生态学报,2002,13(11):1421~1424.

[13] 郭旭东.基于GIS和地统计学的土壤养分空间变异特征研究.应用生态学报,2000,11(4):557~563.