

洋河流域典型旱坡地土壤磷素淋失风险研究

崔力拓¹, 李志伟²

(1.中国环境管理干部学院, 河北 秦皇岛 066004; 2.河北农业大学海洋学院, 河北 秦皇岛 066003)

摘要:为深入研究土壤磷素含量与水体富营养化发生的关系,以秦皇岛洋河流域典型旱坡地为研究对象,采用网格法(5 m×5 m)采集表层(0~30 cm)土壤样品 31 个,进行相关分析。结果表明,土壤有效磷、易解吸磷与地表径流中磷酸根态磷之间存在显著的相关性,一定程度上可用 Olsen-P 作为评价旱坡地土壤磷素淋失风险的指标;同时得出土壤 Olsen-P 含量为 9.40 mg·kg⁻¹ 为洋河流域土壤磷素淋失的临界值,土壤 Olsen-P 含量为 42.73 mg·kg⁻¹ 时,是土壤磷素淋失引起下游水体发生富营养化的临界值,并以此初步对洋河流域旱坡地进行了土壤磷素淋失风险评估。

关键词:洋河流域;旱坡地;磷淋失;风险评估

中图分类号:X522 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)06-2419-04

Risk of Phosphate Leaching from Soil of the Typical Dry-slope Farmland of Yanghe Watershed

CUI Li-tuo¹, LI Zhi-wei²

(1.Environmental Management College of China, Qinhuangdao 066004, China; 2.Ocean College, Agricultural University of Hebei, Qinhuangdao 066003, China)

Abstract: At dry-slope farmland of the Yanghe watershed, Qinhuangdao city, 31 top layer soil samples (0~30 cm) were taken in a regular grid of 5 m by 5 m to study the relation of soil phosphours and water eutrophication. Correlation analysis of these data demonstrated that the correlation was significant among soil Olsen-P, CaCl₂-P and Ortho-P of surface runoff and the Olsen-P of soil could be a assessment indicator of the posphate leaching risk from soil. The critical value of phosphate leaching from soil was 9.40 mg·kg⁻¹ Olsen-P of soil, and when water eutrophication the critical value phosphate leaching from soil was 42.73 mg·kg⁻¹ Olsen-P of soil. According to these, the risk assessment of phosphate leaching from soil of Yanghe watershed was researched.

Keywords: Yanghe watershed; dry-slope farmland; phosphate leaching loss; risk assessment

富营养化是当今世界水污染治理的难题,而磷是大多数水体藻类生长的主要限制因子。在许多地区,以农田排磷为主的非点源磷污染往往是水体磷的最主要来源^[1-3],并且其所占份额仍在不断增加,对农业非点源磷污染的研究和控制已日益受到人们的重视。国内外研究发现,高磷、高有机质、粗质地土壤淋失是磷向水体迁移的主要途径之一^[4-7];当土壤有效磷达到

某一临界值时,土壤中磷淋失显著增加,淋失将成为磷向水体迁移不可忽视源^[6]。但是这些研究只是揭示了土壤有效磷达到某一临界值时,土壤中藻类可以直接吸收利用的水溶性磷开始明显增加,并不能说明土壤有效磷在此浓度下,水体是否会发生富营养化,即不能把土壤中磷素含量与水体富营养化发生的临界值有效联系起来。因此本研究以河北省秦皇岛市洋河流域典型旱坡地为研究对象,采用野外模拟降雨和相关分析的方法,确定土壤磷素发生淋失的临界值及其与洋河水库富营养化发生之间的关系,并对旱坡地土壤磷素的淋失风险作初步评价。这对于探讨农田向水体迁移机制,制定相应的施肥控制措施具有重要的现实意义。

收稿日期:2008-04-10

基金项目:河北省教育厅项目(Z2005112);中国环境管理干部学院基金项目(2005-002)

作者简介:崔力拓(1975—),男,内蒙赤峰人,硕士研究生,讲师,主要从事水土环境方面的教学与研究工作。

E-mail:cuilituo@yahoo.com.cn

1 材料与方法

1.1 研究区概况

洋河流域位于河北省秦皇岛市境内,流域面积 755 km²,地貌类型以山地丘陵为主,大部分坡面都被改造成农田,景观破碎化程度较高,自然植被基本无存;年平均降水量为 700~770 mm,其中 7—8 月降水量占全年降水量的 70%以上;土壤类型主要是褐土,由于人类干扰,植被覆盖低,水土流失严重,每年经暴雨径流携入水库的总氮、总磷约 400 t 和 10 t。

1.2 土壤和径流样品采集

根据洋河流域主要种植的农作物类型,选择种植玉米且耕作年限在 6 a 以上的坡耕地,共选择 31 块典型样地进行土壤样品采集,涉及耕地面积约为 248 km²,占坡面耕地面积的 82%左右。采样在作物收获后进行,每一块样地以 5 m×5 m 网格法采集^[5],在每个节点,采集 0~30 cm 耕层土壤样品,将同一块地采集的土壤混合为 1 个土样,共采集 31 个土样。土壤样品风干后,研磨通过 2 mm 筛孔,供测试分析用。

土壤采集完成后,在 31 块样地采用无界径流小区法分别设置径流收集槽,降雨强度设为洋河流域多年平均降雨强度:53.2 mm·h⁻¹,降雨 30 min,用容器收集全部径流水样。

1.3 样品分析

土壤样品风干后,过 2 mm 筛用于土壤易解吸磷(CaCl₂-P)、土壤有效磷(Olsen-P)的测定分析,CaCl₂-P 采用 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ 溶液浸提(水土比 1:5,浸提 30 min),钼锑抗比色法测定^[11-12];Olsen-P 采用 Olsen 法,0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提,钼锑抗比色法测定^[4];采集的径流样品中,取 250 mL 径流液,通过 0.45 μm 滤膜,过滤后采用异丁醇萃取-钼蓝比色法,测定水样中磷酸根态磷的含量(Ortho-P)^[4]。

2 结果与分析

2.1 土壤中 Olsen-P 与 CaCl₂-P 之间的关系

用 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ 溶液浸提的土壤磷(CaCl₂-P)称为土壤易解吸磷,其含量大小能代表土壤磷从固相向液相迁移量的多少,这部分磷很容易从土壤中进入溶液或地表径流中^[1]。洋河流域旱坡地 31 个土壤样本中 CaCl₂-P 水平在 0.11~7.49 mg·kg⁻¹ 之间,且随着土壤中 Olsen-P 含量的变化而变化,其相关关系如图 1。从图 1 可以看出,当表层土壤的有效磷低于某一数值时,土壤提取液中 CaCl₂-P 浓度几乎为 0,当高于这

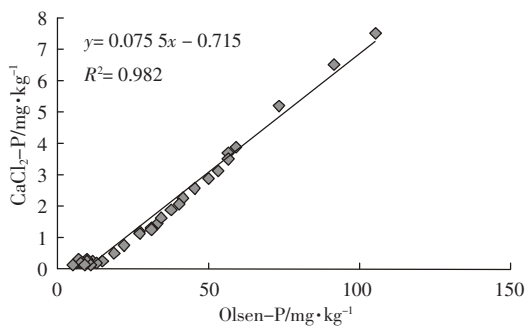


图 1 土壤中 Olsen-P 和 CaCl₂-P 的相关关系

Figure 1 The connection between Olsen-P and CaCl₂-P in soil

一数值时,CaCl₂-P 浓度随有效磷浓度的升高而呈线性增加趋势,相关关系达到极显著水平[经对回归方程进行显著性检验, $F=37.39>F_{0.005}(1,29)=9.23$]。根据回归关系方程计算,得出这一关键数值为 9.47 mg·kg⁻¹,即当土壤中 Olsen-P 的含量超过 9.47 mg·kg⁻¹ 时,CaCl₂-P 浓度将出现明显增加,土壤发生磷素淋失的速效磷临界值为 9.47 mg·kg⁻¹。

Hesketh 和 Brookes 研究发现,不同地区土壤磷发生淋失时土壤速效磷临界值有差异,土壤类型也对临界值大小有影响^[6]。鉴于洋河流域,许多土壤成土母质相同,土壤类型相同,因此,本研究获得的土壤磷发生淋失的有效磷临界值对评价整个洋河流域土壤向水体迁移具有一定的适用性。

2.2 土壤中 Olsen-P 与径流中 Ortho-P 关系

根据一些研究表明,土壤磷素水平的提高是增加旱坡地磷素流失潜能的重要前提,虽然坡地土壤磷素的流失还与坡度、植被覆盖度以及降雨等因素密切相关,但高磷水平土壤的径流中磷含量明显大于低磷水平的土壤^[8]。由于地表径流中 Ortho-P 可被藻类直接吸收利用,它对地表水环境质量有最直接的影响,因此本研究分析了土壤有效磷与地表径流中 Ortho-P 的关系。在对洋河流域典型旱坡地进行模拟降雨条件结果表明,洋河流域旱坡地 31 个不同有效磷水平的土壤中,地表径流中 Ortho-P 的含量是不同的,其含量变化为 0.003~0.148 mg·L⁻¹,其二者之间存在显著的相关关系(相关系数在 0.01 水平上显著),如图 2。从图 2 可以看出,当土壤中有有效磷低于某一数值时,地表径流中的 Ortho-P 的浓度几乎为 0,当有效磷高于这一数值时,径流中 Ortho-P 的浓度随土壤 Olsen-P 的浓度增加而呈线性增加的趋势,相关关系达到极显著水平[经对回归方程进行显著性检验, $F=88.158\ 2>F_{0.005}(1,29)=9.23$]。根据回归方程计算,得出这一临界

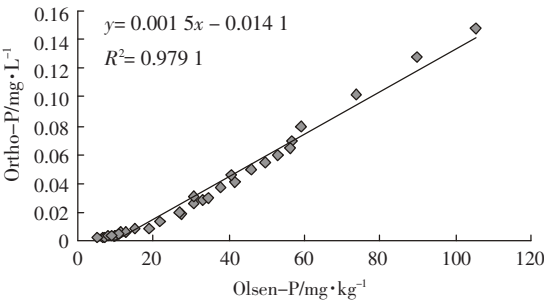


图 2 土壤中 Olsen-P 与径流中 Ortho-P 的相关关系
Figure 2 The connection between the Olsen-P of soil and the Ortho-P of runoff

值为 9.40 mg·kg⁻¹，即土壤中 Olsen-P 的含量超过 9.40 mg·kg⁻¹ 时，径流中 Ortho-P 浓度将出现明显增加，土壤发生磷素淋失的速效磷临界值为 9.40 mg·kg⁻¹。说明在一定程度上可用土壤有效磷的分析资料来评估或预测土壤磷流失对地表水质的潜在影响，这与国外一些学者对不同旱地的研究结论是一致的^[9]。

2.3 径流中 Ortho-P 与土壤中 CaCl₂-P 的关系

从相关分析结果看出(图 3)，洋河流域旱坡地地表径流中 Ortho-P 与土壤易解吸磷 CaCl₂-P 之间存在显著的相关性[经对回归方程进行显著性检验， $F=53.89>F_{0.005}(1,29)=9.23$]。31 个土壤样品中，随着土壤

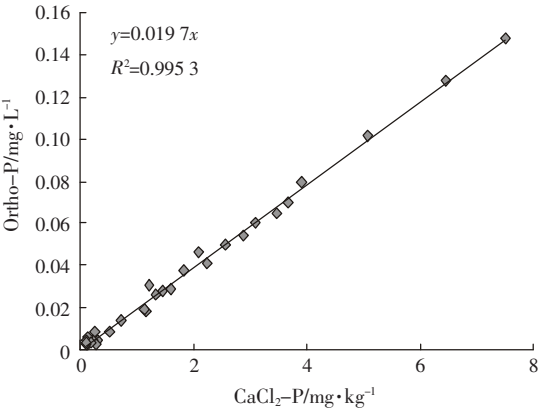


图 3 径流中 Ortho-P 与土壤中 CaCl₂-P 的相关关系
Figure 3 The connection between the Ortho-P of runoff and the CaCl₂-P of soil

中 CaCl₂-P 浓度的增加地表径流中 Ortho-P 基本呈直线增加的趋势，回归方程为 $y=0.0197x-8E-05$ ，经对回归系数进行 F 检验，得到 $F=4.83>F_{0.05}(1,29)=4.18$ ，说明旱坡地上地表径流中 Ortho-P 与土壤中 CaCl₂-P 的关系极为显著；而回归方程中截距经 F 检验，得到 $F=0.0001<F_{0.1}(1,29)=2.89$ ，说明差异不显著，因此回归方程改为 $y=0.0197x$ 。

2.4 土壤磷素淋失风险评价

根据上文的分析表明，洋河流域旱坡地土壤中 Olsen-P、CaCl₂-P 及地表径流中 Ortho-P 之间存在着密切的关系。土壤易解吸磷能较好地反映地表径流中 Ortho-P 含量的变化，而径流中 Ortho-P 的含量与受纳水体中富营养化现象有密切关系，与此同时土壤中 Olsen-P 与 CaCl₂-P 之间存在显著的相关关系，考虑到土壤 Olsen-P 是常规分析项目易获得，因此一定程度上可用 Olsen-P 作为指示洋河流域旱坡地土壤磷素流失对水体环境影响的预警指标，来判断旱坡地磷素非点源污染的可能性。

根据上文得出的土壤中 Olsen-P 与 CaCl₂-P 及土壤中 Olsen-P 与地表径流中 Ortho-P 之间的相关关系方程，分别计算土壤磷素淋失的临界值(表 1)；同时目前国内外的研究结果，表明河流可接受的 Ortho-P 的临界值为 0.06~0.10 mg·L⁻¹^[10]，而进入湖泊(水库)水域时径流中 Ortho-P 浓度达到 0.05 mg·L⁻¹^[4]，就有加速该水体发生富营养化的可能；依据这一数据，计算土壤磷素淋失使受纳水体出现富营养化的临界值，计算结果见表 1。根据表 1 结果看，用两种方法所得到的两个临界值比较接近，相差不到 1%，又由于土壤 Olsen-P 是常规分析项目，容易测得，因此采用 Ortho-P 与 Olsen-P 回归方程进行相关临界值计算。

因此，根据表 1 计算得出土壤磷素淋失的临界值为 9.40 mg·kg⁻¹，水体发生富营养化时土壤磷素的临界值为 42.73 mg·kg⁻¹，本研究初步将洋河流域旱坡地土壤磷素对水环境的潜在影响程度划分为 3 个等级：

表 1 两种方法所得到的 Olsen-P 临界值的差异

Table 1 The difference of the threshold value of Olsen-P obtained by two methods

项目	根据 Olsen-P 与 CaCl ₂ -P 关系方程计算		根据 Ortho-P 与 Olsen-P 关系方程计算	
	Olsen-P/mg·kg ⁻¹	CaCl ₂ -P/mg·kg ⁻¹	Olsen-P/mg·kg ⁻¹	Ortho-P/mg·L ⁻¹
土壤磷素淋失临界值	9.47	0	9.40	0
水体发生富营养化时土壤磷素临界值	43.09	2.54 [*]	42.73	0.05

注：* 根据 Ortho-P 与 CaCl₂-P 的关系： $y=0.0197x$ 计算的结果。

(1)土壤 Olsen-P $<9.40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤磷素几乎不发生淋失,这类旱坡地对水环境质量未产生影响,占调查面积的 16.13%;(2)土壤 Olsen-P 在 $9.40\sim42.73\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,土壤磷素开始流失进入水环境中,这类旱坡地对水环境质量产生一定程度的影响,但不会引起富营养化,占调查面积的 54.83%;(3)土壤 Olsen-P $>42.73\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤磷素高强度淋失,这类旱坡地对水环境质量产生明显的影响,水体将会出现富营养化,占调查面积的 29.04%。从评价结果可以看出,洋河流域旱坡地土壤磷素发生淋失面积占到调查面积的 83.87%。可见在这一区域发生土壤磷素流失的危险不容忽视。根据现有土壤磷素水平,对于速效磷含量大于 $42.73\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的区域应采取相应措施控制土壤磷素向水体迁移,应停止施用磷肥,种植一些需磷较大的作物品种,使土壤有效磷尽快下降到磷淋失临界值以下;其他地块应减少磷肥施用,仅施维持量。

3 结论

洋河流域旱坡地土壤磷素淋失是土壤向水体迁移磷的途径之一。土壤有效磷、易解吸磷与地表径流中磷酸根态磷之间存在显著的相关性,土壤磷素水平地提高是增加旱坡地磷素流失潜能的重要前提,土壤易解吸磷能较好地反映旱坡地地表径流中 Ortho-P 的变化,而土壤中 Olsen-P 与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 有显著的关系,因此在一定程度上可用 Olsen-P 可以更好反映土壤磷素向水体流失的潜力,可以作为评价洋河流域旱坡地土壤磷素流失风险的指标。

以土壤 Olsen-P 作为指标,洋河流域土壤磷素淋失的临界值为 $9.40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,下游水体发生富营养化时土壤磷素的临界值为 $42.73\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,因此初步将洋河流域旱坡地对水环境的潜在影响程度分为 3 个等级:(1)土壤 Olsen-P $<9.40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤磷素几乎不发生淋失,这类旱坡地对水环境质量未产生影响;(2)土壤 Olsen-P 在 $9.40\sim42.73\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,土壤磷素开始流失进入水环境中,这类旱坡地对水环境质量产生一定程度的影响,但不会引起富营养化;(3)土壤 Olsen-P $>42.73\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤磷素高强度淋失,这类旱坡地对水环境质量产生明显的影响,水体将会出现富营养化。洋河流域旱坡地土壤磷素发生淋失面积占到

调查面积的 83.87%。

虽然土壤磷素水平地提高是增加旱坡地磷素流失潜能的重要前提,但是坡地土壤磷素的流失还与坡度、植被覆盖度以及降雨等因素还有密切的关系,仍需要对其进行深入的分析。

参考文献:

- [1] 刘 方,黄昌勇,何腾兵,等.不同类型黄壤旱地的磷素流失及其影响因素分析[J].水土保持学报,2001,15(2):37-40.
LIU Fang, HUANG Chang-yong, HE Teng-bing, et al. Phosphorus loss by runoff in various dryland from yellow soil and its affecting factors[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(2):37-40.
- [2] 晏维金,章 申,唐以剑.模拟降雨条件下沉积物对磷的富集机理[J].环境科学学报,2000,20(3):332-337.
YAN Wei-jin, ZHANG Shen, TANG Yi-jian. Sediment enrichment mechanisms of phosphorus under simulated rainfall conditions[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(3):332-337.
- [3] 刘月英,王秀芬.通过径流观测估计磷风险评估模型指数[J].水土保持科技情报,2002(2):28-30.
LIU Yue-ying, WANG Xiu-fen. Estimating model index of phosphorus risk by runoff observation[J]. *Scientific and Technical Information of Soil and Water Conservation*, 2002(2):28-30.
- [4] Sharpley A N, Chapra S C, Wedepohl R, et al. Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: Issues and options[J]. *J Environ Qual*, 1994(23):437-451.
- [5] Breeuwsma A, Reijerink G A, Schoumans O F. Impact of manure on accumulation and leaching of phosphate in areas of intensive livestock farming[C]//Steele K (ed.). *Animal waste and the land-water and interface*. Boca Raton FL: Lewis Publ, 1995. 239-249.
- [6] Hesleth N, Brookes P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching [J]. *J Environ Qual*, 2000, 29(1):105-110.
- [7] Djodjic F, Borling K, Bergstrom L. Phosphorus leaching in relation to soil type and soil phosphorus content[J]. *J Environ Qual*, 2004, 33(2):678-684.
- [8] 沈善敏.中国土壤肥力[M].北京:中国农业出版社,1998.224-234.
SHEN Shan-min. *Chinese soil fertility*[M]. Beijing: China Agricultural Publishing Press, 1998.224-234.
- [9] Sims J T. Phosphorus soil testing: Innovations for water quality protection [J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 1998, 29(11):1471-1489.
- [10] John N, Tim M H. The selective removal of phosphorus from soil: Is event size important?[J]. *J Environ Qual*, 2001, 30:538-545.
- [11] Houba E L. Applicability of the 0.01M CaCl_2 as a single extraction solution for the assessment of the nutrient status of soils[J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 1990(21): 2281-2287.
- [12] Walf A M, G Baker. Algae-available phosphorus in agricultural soils [J]. *J Environ Qual*, 1981, 14(3):341-348.