

## 北京官厅水库流域农田地表径流 生物可利用磷流失规律\*

黄满湘<sup>1,2</sup> 周成虎<sup>2</sup> 章申<sup>2</sup> 张秀梅<sup>2</sup>

(1:中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; 2:中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**提 要** 在模拟降雨条件下(30-69mm/39min), 对官厅水库流域玉米地和休闲地地表径流泥沙和生物可利用磷(BAP)流失进行了初步研究. 累积泥沙产量受雨强、坡度和作物覆盖影响, 变幅为305.1-24933.4g/10m<sup>2</sup>; 径流平均颗粒态生物可利用磷(BPP)、溶解态磷(SP)浓度都超出水体允许临界值0.02mg/L, 表明流域农田地表径流对库区水体存在潜在污染危害; 径流累积BAP流失达0.08-4.804g/10m<sup>2</sup>, 估算的农田径流BAP流失达0.49kg/(hm<sup>2</sup>·a)以上. 79.7%以上的BAP是颗粒态的. 研究结果有助于采取措施减少农田径流向库区输入生物可利用磷、准确地评估流域农业管理实践对水库水质的影响.

**关键词** 生物可利用磷 侵蚀泥沙 农田地表径流 官厅水库流域

**分类号** X52

农业非点源磷污染对水环境的恶化有着十分显著的贡献, 农田径流磷素流失与湖泊水库富营养化现象的发生有着密切的关系<sup>[1,2]</sup>. 在我国, 湖泊水库磷氮养分负荷超过一半来自农业, 由农田径流磷的转运引起的富营养化相当严重<sup>[3]</sup>. 磷肥的施用导致了磷在土壤累积<sup>[4]</sup>和河流湖泊水体磷浓度的上升, 农田地表径流磷养分流失加速了磷素敏感区域水体, 如太湖、巢湖、白洋淀和渤海湾水体的富营养化<sup>[5]</sup>. 但是, 目前关于磷从农田向水体转运过程、机制和影响因素的有关信息是很少的; 关于农田地表径流生物可利用磷(BAP)迁移的研究未得到重视. 农田地表径流BAP是藻类直接或潜在可利用磷, 包括溶解态磷(SP)和颗粒态磷(PP). 大部分溶解态磷可被藻类直接吸收利用, 径流侵蚀泥沙携带的部分颗粒态磷是湖泊水库浮游生物的长期的潜在可利用磷源. 过去的水质立法和管理策略都以减少径流全磷(TP)和溶解态磷向水体输入为目标<sup>[6]</sup>. 然而, 一些研究<sup>[7]</sup>表明, 减少全磷的输入, 几乎不影响到湖泊水库生物生产力, 因为此时BAP的输入不一定降低. 因此, 研究BAP对准确评价农田暴雨径流对地表水体生物生产力的影响是必不可少的.

位于北京西北部的官厅水库, 是北京市最重要的两个供水水源之一. 然而来自官厅水库流域上游的大量点源和非点源污染使官厅水库从建库至今, 先后发生了有机污染和磷氮引起的富营养化等<sup>[8]</sup>, 由于磷是限制库区浮游植物生长的因子和水库富营养化的主要制约条件<sup>[9]</sup>, 如何控制流域农田磷通过地表径流向库区的转运是改善水库富营养化状况的主

\* 国家自然科学基金重大项目(39790100)资助. 2002-08-25收稿; 2003-01-09收修改稿. 黄满湘, 男, 1967年生, 博士后.

要途径之一。因此, 本研究在模拟降雨径流基础上, 通过测定流域径流溶解态磷、颗粒态生物可利用磷(BPP)浓度和负荷, 探讨官厅流域农田径流 BAP 流失规律, 为控制库区水体富营养化提供基础信息资料。

## 1 材料和方法

### 1.1 流域概况

官厅水库位于北京西北 100 多 km 的永定河上, 入库水系有桑干河、洋河和妫水河, 流域面积 47000km<sup>2</sup>。流域大致位于 39° -40° N, 112° -117° E, 为暖温带亚湿润的华北沿海平原向中温带干旱的内蒙高原过渡的地带, 属于中温带亚干旱的山间盆地。土壤类型为褐土, 总耕地面积为 2×10<sup>6</sup>hm<sup>2</sup>。农作物以玉米、高粱、谷子等杂粮为主, 此外还有部分果林。流域多年平均降水量为 607mm; 年降水的 60%-70%集中于夏季, 7 月最多, 8 月次之, 雷阵雨较多, 形成 6-8 月的夏汛<sup>①</sup>。

表 1 供试土壤主要理化性质  
Tab. 1 Physics and chemical properties of experiment soil

土深 (cm)	容重 (g/cm <sup>3</sup> )	砂粒 (%)	粉粒 (%)	粘粒 (%)	有机质 (%)	阳离子代换量 (cmol/kg)	全氮	全磷	Olsen-P (mg/kg)	生物可利用磷
0-20	1.32	31	51.2	17.8	3.03	15.8	1118	1001	41.9	160

### 1.2 试验处理和模拟降雨

选择库区附近的南寨玉米地和休闲地进行模拟降雨径流试验, 土壤理化性质如表 1。试验处理采用配对比较设计<sup>[11]</sup>, 地面条件和降雨强度因子的几个组合代表库区附近典型的降雨-侵蚀-径流情形(表 2)。试验小区处理和降雨强度如下: (1) 雨强因子试验: 一般暴雨(A 处理, 0.77mm/min)和大暴雨(B 处理, 1.40mm/min), 其余条件为缓坡 5°。(2) 坡度因子试验: 5°(B 处理)和 10°(C 处理), 其余条件相同; A、B、C 均为翻耕平整裸地, 不施肥。(3) 作物覆盖因子试验: 裸地(D1 处理)和玉米区(D2 处理, 覆盖率 45%), 均施肥(P) 90kg/hm<sup>2</sup>, 均匀混入表土 15cm, 其余条件相同。

表 2 模拟降雨径流试验处理区资料  
Tab. 2 Rainfall-runoff information for all the plots

处理	坡度	覆盖率 (%)	磷肥 <sup>+</sup> (kg/hm <sup>2</sup> )	雨前土壤 含水量(%)	雨后土壤 含水量(%)	雨强 (mm/min)	开始 产流	累积径流 深(mm)	径流 系数(%)	泥沙负荷 (g/10m <sup>2</sup> )
A	5°	0	0	11.3	31.3	0.77	12'00"	4.7	15.7	305.1
B	5°	0	0	10.9	28.8	1.40	3'00"	36.5	70.9	6605.3
C	10°	0	0	11.4	29.6	1.28	1'46"	42.1	87.0	24933.4
D1	5°	0	90	18.6	26.3	1.76	4'14"	48.6	71.4	3902.3
D2	5°	45	90	21.4	31.0	1.76	5'30"	33.4	49.0	2201.6

模拟降雨采用中国科学院地理科学与资源研究所的模拟降雨装置系统<sup>[12]</sup>。径流试验

① 官厅水系水源保护领导小组办公室。官厅水系水源保护的研究(1973-1975 年科研总结)。

小区水平受水面积  $2\text{m}(\text{宽}) \times 5\text{m}(\text{长})$ . 在小区两长边及顶端, 用  $25\text{cm}$  高不锈钢薄金属板围成, 薄金属板插入土中  $15\text{cm}$ , 外露  $10\text{cm}$ , 防止降雨泥沙溅出和小区外围水分进入小区, 每处理设三个重复; 在小区下端, 安装不锈钢 V 型集水堰. 由一塑料管连接到带有刻度的塑料桶, 收集和测定径流体积.

### 1.3 取样和数据分析

降雨历时  $39\text{min}$ , 记录开始降雨时间、产流时间、停水时间、地面断流时间. 地面产流后, 每  $3\text{min}$  为一个时段, 用干净的塑料桶收集径流, 充分搅动后, 用  $100\text{mL}$  塑料瓶分取径流水样. 取水样离心  $5\text{min}(266\text{cm}/\text{k})$ , 经  $0.45\ \mu\text{m}$  滤膜过滤, 用比色法测定溶解态磷(SP)浓度. 未过滤水样用高氯酸消解, 用同样的方法测定全磷(TP)浓度. 颗粒态磷(PP)浓度为全磷浓度与溶解态磷浓度之差. 取未过滤径流水样, 用饱和氧化铁滤纸法测定其生物可利用性磷(BAP)浓度<sup>[13]</sup>. 计算滤渣中的 TP、BPP 全量(BAP-SP)和 BPP 含量. 取  $250\text{mL}$  径流水样, 过滤, 计算滤液体积; 风干泥沙, 称重, 计算径流泥沙浓度. 径流磷负荷为各时段磷流失量之和, 径流磷平均浓度为体积平均浓度. 用配对 t 检验法确定同因素不同水平侵蚀区径流磷浓度和负荷等特征参数差异的显著性<sup>[14]</sup>, 所有的统计分析在  $P=0.05$  水平完成.

## 2 结果和讨论

### 2.1 产流排水与侵蚀产沙

不同处理下, 降雨—径流关系如表 2. 模拟降雨条件下, 不同处理小区开始产流时间存在显著的差异. B 区产流明显早于 A 区; C 区早于 B 区, 说明降雨强度和坡度是影响产流发生时间的两个重要的因素. 其它条件相同时, 雨强越大, 从降雨到产流发生时间越短; 坡度越大, 降雨开始后, 坡面较快出现径流. D1、D2 区产流发生时间存在差异, 作物覆盖推迟产流发生. 与 B 区比较, D1、D2 区降雨前土壤含水量高, 从降雨到产流发生的时间反而延长, 原因可能在于翻耕地 B 区遇降雨表土崩解碎裂堵塞表土孔隙减少入渗, 迅速发生板结有利于地面产流.

不同处理区累积径流深存在显著差异. A 区径流深小于  $5\text{mm}$ , 不到 B 区的  $1/6$ . 坡度增大, C 区径流深也随着增加. 在作物覆盖下, 径流减少, 径流系数也降低. 累积侵蚀泥沙同径流有相似的趋势. 干旱的翻耕地, 坡度越大, 遭遇大暴雨时, 侵蚀强度越大; 缓坡地遭遇一般暴雨时土壤侵蚀强度小. 裸露区累积侵蚀泥沙大于作物覆盖区. 值得注意的是 D1、D2 区累积侵蚀泥沙量都较小, 而且其侵蚀泥沙浓度接近一般暴雨的 A 区. 这是因为这两区降雨前表土含水量较高, 表土有一定的结构, 较为紧实, 不利于细沟和细沟间侵蚀的发生. 这些结果说明降雨强度、坡度、作物覆盖和降雨前土壤湿度是影响农田地表径流和侵蚀产沙的关键因素. 表土松散, 坡度越大的裸露农田, 遇大暴雨产生最多的地表径流和侵蚀泥沙.

### 2.2 农田径流磷养分流失

2.2.1 径流中磷浓度变化 地表径流体积平均磷浓度(SP、BPP、BAP)如表 3. 径流 BPP、BAP 浓度与排水速率无明显相关关系 ( $r=0.54$ ), 如图 1(a)、(b); 但径流 BPP、BAP 浓度都与泥沙浓度有密切的相关关系 ( $r=0.96$ ), 如图 1(c)、(d), 这与径流颗粒态磷浓度与泥沙浓度成正相关的规律相似<sup>[1]</sup>. 径流 BPP 浓度与泥沙浓度的正相关关系说明颗粒态是农田暴雨

径流生物可利用磷流失的主要途径.

表 3 地表径流磷负荷及侵蚀泥沙 BAP 富集系数  
Tab.3 Loss of phosphorus in surface runoff and BAP enrichment ratios of eroded sediment

		径流磷浓度			径流磷负荷				侵蚀泥沙生物可利用磷		
		SP (mg/L)	BPP (mg/L)	BAP (mg/L)	SP (g/10m <sup>2</sup> )	BPP (g/10m <sup>2</sup> )	BAP (g/10m <sup>2</sup> )	PP (g/10m <sup>2</sup> )	TP (g/10m <sup>2</sup> )	含量 (mg/kg)	富集系数 ER
雨强	A	0.17	1.53	1.70	0.008	0.072	0.08	0.431	0.439	235.9	1.47
	B	0.24	4.20	4.44	0.088	1.534	1.621	7.138	7.229	232.0	1.45
	NS	S	S	S	S	S	S	S	S	NS	NS
坡度	B	0.24	4.20	4.44	0.088	1.534	1.621	7.138	7.229	232.0	1.45
	C	0.37	11.5	11.42	0.156	4.649	4.804	20.798	20.954	186.4	1.17
	NS	S	S	S	S	S	S	S	S	NS	NS
覆盖	D1	0.47	1.76	2.23	0.229	0.856	1.084	5.470	5.698	219.0	1.37
	D2	0.45	1.76	2.21	0.150	0.586	0.736	3.297	3.447	266.3	1.66
	NS	NS	NS	S	S	S	S	S	S	NS	NS

\* NS 表示差异不显著, S 表示差异显著 (P=0.05) .

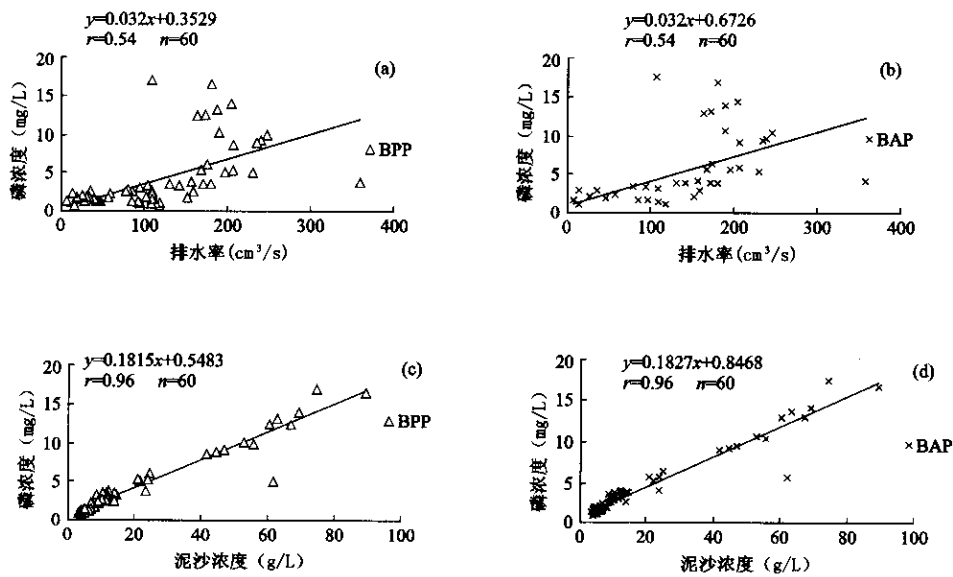


图 1 径流 BPP、BAP 浓度与径流排水率 (a, b), 径流泥沙浓度 (c, d) 相关关系

Fig.1 Relationship between the concentration of BPP, BAP and discharge of runoff, and sediment in runoff

雨强、坡度增大, 径流 SP 浓度有增加的趋势, 但效果不显著. 随着降雨强度和径流区

坡度增加, 径流水土比和水土混合作用时间增加, 有利于更多的溶解态磷进入径流水中. 作物覆盖对 SP 浓度影响作用也不显著. 一般认为, 从作物或作物残茬溶出的磷可增加径流 SP 浓度<sup>[15]</sup>, 本试验没有观测到这一现象, 可能是作物对径流 SP 的溶出贡献小; 也可能是施用磷肥对径流 SP 浓度的增大效应使作物覆盖的效果不明显. 作物覆盖试验区径流溶解态磷浓度大于雨强和坡度试验组, 是雨前施用磷肥的结果. 由于试验土壤速效磷含量水平

高(表 1), 施用磷肥过多在土壤中大量积累造成的)或在雨前施用了磷肥, 所有试验区径流 SP 浓度都大于水质允许临界值, 虽然在进入河道和最终进入库区会有所降低, 但对水体的影响是不可忽视的: 因为官厅水库库区水体磷浓度达 0.026mg/L, 超过了临界值, 而 C、N 含量非常丰富, 所以, 减少 SP 浓度已成为控制库区富营养化的关键<sup>[9]</sup>, 而如何合理施用磷肥, 减少土壤磷的累积和径流流失, 降低库区上游农田径流溶解性磷浓度, 应当引起高度重视.

B 区 BPP、BAP 浓度大于 A 区, 而 C 区径流 BPP、BAP 浓度大于 B 区, 表明雨强、坡度对径流 BPP、BAP 浓度有显著的增大作用; 但 D1、D2 区径流 BPP、BAP 浓度差异不显著, 表明作物覆盖对径流 BPP、BAP 浓度影响不明显. 这与前面雨强、坡度和作物覆盖对土壤侵蚀的影响效果一致.

2.2.2 磷负荷和侵蚀泥沙磷富集 径流磷的流失随降雨径流的延续而增长, 图 2(a)、(b) 表示降雨过程径流 SP、BPP 流失累积量随时间的变化. 流失 BPP 累积值都大于 SP 值. 降雨过程中 SP、BPP 流失累积量与时间线性正相关, 相关系数都在 0.97 以上.

雨强、坡度、作物覆盖三组对比试验条件下, 径流 BAP 负荷差异显著(表 3). 雨强、坡度增加, 显著增大径流磷流失. 作物覆盖显著减少径流 BAP 流失. 径流 BAP 负荷是化学因素(径流磷浓度)和水文因素(径流)对养分转移共同作用的结果, A 区 BAP 浓度低(1.70mg/L), 径流系数最低(15.7%), 其径流 BAP 流失量最低; B 区有较高的 BAP 浓度(4.44mg/L)和较大的径流系数(70.9%), 其径流 BAP 流失也较大; C 区 BAP 浓度(11.42mg/L)和径流系数(87%)都最高, 其径流 BAP 流失也最大. 次降雨过程累积 BAP 流失量相当于 10mm 土体 Olsen-P 量百分数, A、B、C、D1、D2 区分别为 1.4%, 29.3%, 86.9%, 19.6% 和 13.3%. 假定损失强度最低的 A 区情形具有流域内农田水土侵蚀和磷流失的代表性, 并假定 6-8 月 50%降水产生地表径流, 则 BAP 损失达 0.49kg/(hm<sup>2</sup>·a), 相当于 10mm 土体中 8.87%的 Olsen-P. 因此, 流域农田暴雨径流磷流失, 不仅为库区水体提供了丰富的潜在可利用性磷源, 而且也使土壤磷肥力遭到损失.

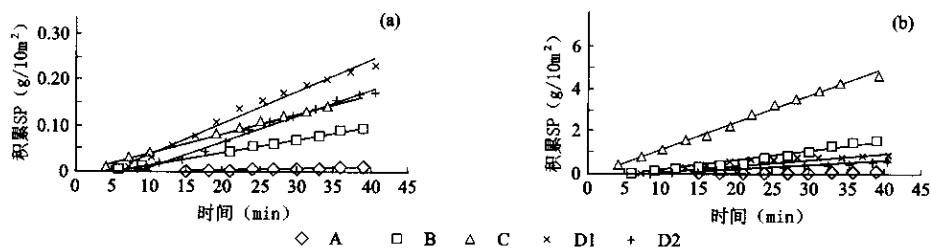


图 2 降雨过程径流磷流失随时间的变化 (a) SP; (b) BPP  
Fig.2 Accumulated SP (a) in surface runoff, accumulated BPP yield (b) from each plot

雨强、坡度和作物覆盖因子对侵蚀泥沙 BPP 的富集系数(ER)都大于 1(表 3), 表明在试验条件下的地表径流都发生了 BPP 的富集. 但是, 雨强增大、坡度增加和地表裸露的条件下, 侵蚀强度增大, 侵蚀泥沙平均 BPP 含量及其富集系数都呈现降低的现象, 因此, 暴雨径流泥沙 BPP 的流失和富集也类似于泥沙颗粒态磷的流失及其富集规律<sup>[12]</sup>.

### 2.3 径流生物可利用磷占径流流失磷的比例

不同条件下径流磷的损失水平不同, BAP 占 TP 的份额相差不大, 在 18.2%-22.9%之间, 但 SP、BPP 的贡献受施肥的影响则差别明显. 在未施肥条件下, SP/TP 少于 2%; 施肥

条件下, SP/TP 达 4.4%。不施肥处理区 SP/BAP 低于 10%, 并随雨强和坡度增加而降低。施肥条件下, SP 对 BAP 的贡献增大到 21%。

径流颗粒态磷的生物可利用性百分数随径流泥沙平均浓度增加而增大, PP 生物可利用性与径流泥沙浓度对数的回归线性方程为  $y=2.8\ln x+11.60$  ( $r^2=0.80$ ), 这与前面分析的径流磷浓度与泥沙浓度成正相关的结论是一致的。但与 Sharpley 的结论<sup>[16]</sup>不同。Sharpley 统计分析了俄克拉荷马洲和德克萨斯洲南部平原 20 个研究流域的径流颗粒态磷的生物可利用性后, 发现径流泥沙磷的生物可利用性百分数随径流平均泥沙浓度而减少; 同时, 官厅水库流域农田径流泥沙颗粒态磷的生物可利用百分比为 15.6%-22.4%, 略低于 Lee 推荐的 23%<sup>[17]</sup>, 原因可能在于试验径流小区坡长短不利于径流对细颗粒的选择性搬运, 因此, 应当进一步对入库河口泥沙颗粒态磷的生物可利用性进行分析。

### 3 结论

在官厅水库典型区域农田的模拟降雨试验表明:

(1) 次降雨过程累积泥沙产量为 305.1-24933.4g/10m<sup>2</sup>, 坡度越大的裸露农田, 遇大暴雨产生的地表径流和侵蚀泥沙最多;

(2) 农田径流累积 BAP 流失达 0.08-4.804g/10m<sup>2</sup>, 估算的流域农田径流 BAP 流失达 0.49kg/(hm<sup>2</sup>·a) 以上;

(3) 径流平均 BPP、SP 浓度都远大于水体允许临界值 0.02mg/L, 说明流域农田地表径流是官厅水库水体的主要污染源之一;

(4) 79.9% 以上的径流 BAP 是颗粒态的, 侵蚀泥沙携带的大量颗粒态磷可能成为官厅水库浮游生物长期丰富的潜在可利用磷源。

### 参 考 文 献

- 1 Andrew N. Sharpley, Chapra S C, Wedepohl R, *et al.* Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: Issues and options. *J Environ., Qual* 1994, **23**:437-451
- 2 高 超, 张桃林. 农业非点源污染对水体富营养化的影响及对策. *湖泊科学*. 1999, **11**(4): 369-375
- 3 金相灿, 屠清瑛, 章宗涉等. 中国湖泊富营养化. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 1-5; 103-115
- 4 Sims J T, Edwards AC, Schoumans O F, *et al.* Integrating soil phosphorus testing into environmentally based agricultural management practices. *J Environ Qual*, 2000, **29**:60-71
- 5 屠清瑛, 顾丁锡, 尹澄清等. 巢湖——富营养化研究. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990: 226
- 6 U S Environmental Protection Agency. Quality criteria for water. U S Gov Print Office, Washington D C, 1976
- 7 Gray C B J, Kirkland R A. Suspended sediment phosphorus composition in tributaries of the Okanagan Lakes, BC. *Water Res*, 1986, **20**: 1193-1196
- 8 梁 涛, 张秀梅, 章 申. 官厅水库及永定河枯水期水体氮、磷和重金属含量分布规律. *地理科学进展*, 2001, **20**(4): 341-346
- 9 袁博宇. 官厅水库水质现状及趋势分析. *北京水利*, 2000, **5**: 29-31
- 10 Douglas C. Montgomery. Design and analysis of experiments. Third edition. New York John Wiley & Sons Inc, 1991: 43-50
- 11 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. *环境科学学报*, 2000, **20**(3): 332-337
- 12 Sharpley A N. Estimating phosphorus in agricultural runoff available to several Algae using iron-oxide paper strips. *J Environ*

- Qual*, 1993, **22**: 678-680
- 13 Steel R G D, Torrie J H. Principles and procedures of statistics. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Book Co, 1980
- 14 Timmons D R, Holt R F, Latterell J J. Leaching of crop residues as a source of nutrients in surface runoff water. *Water Resour. Res*, 1970, **6**:1367-1375
- 15 Andrew N. Sharpley, Smith S J, *et al.* The transport of bioavailable phosphorus in agricultural runoff. *Environ Qual*, 1992, **21**: 30-35
- 16 Lee G F, Jones R A, Rast W. Availability of phosphorus to phytoplankton and its implications for phosphorus management strategies. In: Loehr R C *et al.* ed. Phosphorus management strategies for lakes. Ann Arbor Sci, Ann Arbor, MI. 1980: 259-308

## Bioavailable Phosphorus Export by Surface Runoff from Agricultural Field Plots in Guanting Watershed, Beijing

HUANG Manxiang<sup>1,2</sup>, ZHOU Chenhu<sup>2</sup>, ZHANG Shen<sup>2</sup> & ZHANG Xiumei<sup>2</sup>

(1: Institute of Remote Sensing Application, CAS, Beijing 100101, P.R.China;

2: Institute of Geographic Sciences and Natural Resource Research, CAS, Beijing 100101, P.R. China )

### Abstract

Bioavailable P (BAP) in agricultural runoff represents P potentially available for algal uptake and consists of soluble P (SP) and a variable portion of particulate P (PP). Runoff and soil losses from agricultural fields were investigated as major nonpoint sources of phosphorus(P) entering Guanting Reservoir, Beijing. There is relatively little information on bioavailable P transport from cropland of Guanting watershed. Soil and bioavailable P in surface runoff from a series of plots in the watershed were evaluated under simulated rainfall conditions. The objectives of this study were to evaluate the effects of rainfall intensity, slope, crop cover, and fertilizer application on bioavailable P concentrations in surface runoff and eroded soil. Accumulated sediment yields varied from 305.1 to 24933.4g/10m<sup>2</sup>, depending on rainfall intensity, slope, crop cover, and fertilizer application. Weighted average concentrations of soluble P(SP) and particulate bioavailable P (BPP) were much higher than 0.02mg/L, the limiting concentration for lake (reservoir) water. This result showed the potential contamination of reservoir water from agricultural surface runoff. Accumulated BAP losses were 0.08-4.804g/10m<sup>2</sup> for croplands. The estimated annual loss of BAP was more than 0.49kg/hm<sup>2</sup> per year for croplands in Guanting watershed. Most of BAP loss was in the PP form, which accounted for more 79.7% of BAP loss from cropland. The large amount of BPP may constitute a long-term source of potentially bioavailable P in Guanting Reservoir.

**Keywords:** Bioavailable phosphorus; eroded sediment; agricultural surface runoff; Guanting watershed