第 40 卷 第 2 期
2003 年 3 月

土 壤 学 报
ACTA PEDOLOGICA SINICA

Vol. 40, No. 2
Mar., 2003

农田暴雨径流侵蚀泥沙对氮磷的富集机理*

黄满湘　章　申　晏维金
(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京　100101)

SEDIMENT ENRICHMENT MECHANISMS OF NITROGEN AND PHOSPHORUS UNDER SIMULATED RAINFALL CONDITIONS

Huang Man-xiang　Zhang Shen　Yan Wei-jin
(*Institute of Geographical Science and Resource Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*)

关键词　地表径流, 侵蚀泥沙, 团聚体, 颗粒态氮磷, 富集系数
中图分类号　S153.61

在农田暴雨径流条件下, 地表径流携带的侵蚀泥沙比原土壤有较高的养分含量, 表现出对氮磷等养分的富集作用, 富集系数(Enrichment Ratio, ER) 随侵蚀泥沙流失的增加而减少[1]。大多文献把侵蚀泥沙对养分的富集归因于径流对土壤表面富含养分的有机质和粘粒的选择性搬运[2]。由于被选择搬运的农田表层土壤有机质在侵蚀泥沙中只占很小的一部分, 因而对侵蚀泥沙的养分富集贡献也一定很小; 同时, 土壤和侵蚀泥沙氮磷养分主要是存在于不同粒径的土壤团聚体中, 即颗粒态氮磷的流失主要是通过结合有机氮磷的泥沙迁移作用完成的, 侵蚀泥沙的养分富集作用也不是简单的粘粒的选择性搬运。因此, 暴雨径流中颗粒态氮磷等养分流失过程的本质, 有待进一步解释。本研究通过室内模拟降雨径流实验, 分析降雨径流侵蚀泥沙的团聚体组成及其氮磷含量特征, 研究农田暴雨径流侵蚀泥沙对氮磷养分的富集机理。

1　材料和方法

室内模拟降雨径流实验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[3], 径流槽坡度为 5 度, 3 个重复; 每槽水平受水面积 0.5m(宽) × 2m(长), 槽深 0.4 m, 槽两边及顶端加 0.5 m 塑料挡板, 防止雨水泥沙溅出, 在槽的下端安装 V 型集水堰, 由塑料管连接到带刻度的塑料桶, 收集和测定地表径流体积。

实验土壤为粉砂质粘壤土, 取自中国农业大学科学园试验田, 其理化性质见表 1。取田间表层30 cm 土壤, 每 10 cm 分为一层; 风干, 过 4 mm 筛, 按照田间土壤容重装入径流槽, 用滴灌法将土壤湿润。降雨雨强为 72 mm h^{-1}, 共历时 44 min。降雨约 2 min 后开始产流, 约 35 min 地面产流排水达到最大值, 稳定地保持到降雨结束, 由于侵蚀泥沙量小, 以每 9 min 为一时段(第一时段为 8 min) 收集径流泥沙。

降雨实验开始前, 取槽中上层土壤, 依次用孔径为 1, 0.5, 0.25, 0.1, 0.045 mm 一组金属筛过筛, 得到 6 组不同粒径的团聚体: > 1, 1~ 0.5, 0.5~ 0.25, 0.25~ 0.1, 0.1~ 0.045, < 0.045 mm, 风干、称重, 计算不同粒径团聚体的重量含量(表 2); 同样, 用上述孔径的金属筛组对各时段水沙进行湿筛[4], 风干、称重, 计算不同粒径团聚体的重量(表 3)。

* 国家自然科学基金重大项目(批准号 39790100) 资助
收稿日期: 2001-11-13; 收到修改稿日期: 2002-08-02

表 1　供试土壤理化性质[1)]

土壤深度 (cm)	粘粒 (%)	粉粒 (%)	砂粒 (%)	容重 ($Mg\ m^{-3}$)	阳离子交换量 ($cmol\ kg^{-1}$)	总氮 ($g\ kg^{-1}$)	总磷 ($g\ kg^{-1}$)
0~ 20	19.8	51.2	29	1.1	15.77	1.64	1.59
20~ 30	19.0	59.0	22	1.2	14.30	1.32	1.41

1) 粘粒: < 0.002 mm; 粉粒: 0.05~ 0.002 mm; 砂粒: > 0.05 mm

表 2　实验土壤的团聚体组成及氮磷含量

团聚体粒径(mm)	> 1	1~ 0.5	0.5~ 0.25	0.25~ 0.1	0.1~ 0.045	< 0.045
重量组成($kg\ kg^{-1}$)	0.48	0.23	0.13	0.11	0.05	0.01
含氮量($g\ kg^{-1}$)	1.65	1.62	1.69	1.62	1.60	1.59
含磷量($g\ kg^{-1}$)	1.59	1.51	1.67	1.78	1.60	1.40

表 3　径流不同时段平均侵蚀泥沙量及不同粒径团聚体的重量(g)

时间 (min)	泥沙	SD[1)]	团聚体粒径(mm)											
			> 1	SD	1~ 0.5	SD	0.5~ 0.25	SD	0.25~ 0.1	SD	0.1~ 0.045	SD	< 0.045	SD
8	28.3	5.63	1.4	0.96	2.6	0.46	3.8	0.52	5.0	1.71	5.4	2.31	10.1	1.14
17	49.1	5.48	1.4	0.54	3.8	1.18	7.6	3.24	11.0	2.12	10.6	6.58	14.7	1.01
26	42.3	2.82	0.9	0.20	2.0	0.38	4.5	1.74	10.9	1.61	12.5	4.06	11.6	1.12
35	38.2	3.42	0.6	0.13	1.4	0.28	3.1	1.78	10.1	1.57	13.6	0.94	9.5	0.56
44	31.9	4.23	0.5	0.22	1.1	0.32	2.4	1.74	5.2	2.60	13.2	0.89	9.6	1.35

1) SD 为标准差

用凯氏法测定土壤和侵蚀泥沙团聚体含氮量(侵蚀泥沙中大于 1 mm 粒径团聚体量太少, 归入 1~ 0.5 mm 粒级), 用浓 H_2SO_4– $HClO_4$ 消煮—钼锑抗比色法测定含磷量[5], 根据团聚体的组成及其氮磷含量算出原土壤和不同时段侵蚀泥沙平均氮磷含量。

2　结果与讨论

2.1　径流侵蚀泥沙的团聚体重量组成特征

由不同时段侵蚀泥沙的 6 个粒级团聚体重量(表 3), 计算不同时段侵蚀泥沙的团聚体重量含量。比较侵蚀泥沙和原土壤的团聚体组成发现, 侵蚀泥沙中> 1 mm 和 1~ 0.5 mm 团聚体含量明显低于原土壤; 0.5~ 0.25 mm 团聚体含量没有净变化($\log(100\times C/C_0) = 2$); 0.25~ 0.1 mm、0.1~ 0.045 mm、< 0.045 mm团聚体含量都高于原土壤(图 1)。大粒径土壤团聚体是不稳定的, 在雨滴打击下, 被剥离形成较细的团聚体; 同时, 侵蚀小区表面只形成很薄的水层, 地表径流没有足够的能量搬运大粒径团聚体[6], 所以, 侵蚀泥沙中细粒径团聚体所占的比重大; 0.25~ 0.1 mm、0.1~ 0.045 mm、< 0.045 mm 三个粒径组的团聚体含量达到 81% 以上, 大大高于原土壤中的 16%; > 1 mm、1~ 0.5 mm、0.5~ 0.25 mm 三个粗粒径组团聚体含量只占 19%, 大大低于原土壤中的 84%(图 2, 表 2)。因此, 侵蚀泥沙与土壤的团聚体组成存在明显的差异, 径流泥沙的流失主要以粒径为 0.25 mm 以下的团聚体为主。

侵蚀泥沙的团聚体组成随时间而变化(图 2)。随着降雨径流的延续, > 0.25 mm 的粗团聚体含量下降; < 0.25 mm 团聚体含量呈增加的趋势, 其中 0.1~ 0.045 mm 团聚体含量不断增加; 0.25~ 0.1 mm 团聚体和< 0.045 mm 团聚体含量变化表现为相反的过程, 从产流开始至 33 min, 0.25~ 0.1 mm 团聚体含量也不断增加, 而< 0.045 mm 团聚体含量不断下降; 随后, 0.25~ 0.1 mm 团聚体含量下降, < 0.045 mm 团聚体含量增加。这反映了暴雨径流选择搬运细颗粒的过程是随时间变化的。在雨滴剥离分散大团聚体和径流选择搬运细颗粒的同时, 较粗的颗粒沉积甚至覆盖在侵蚀小区表面, 使被选择搬运的侵蚀泥沙

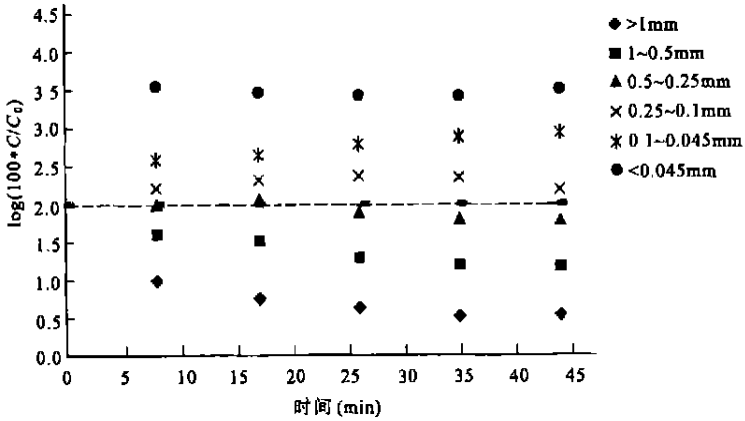

图1 侵蚀泥沙团聚体含量(C)同原土壤团聚体含量(C_0)的比值随时间的变化

(虚线表示 $C=C_0$)

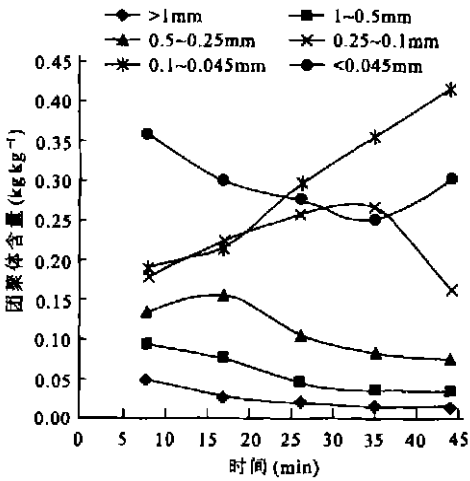

图2 不同粒径团聚体含量随时间的变化

变粗[7]。因此,降雨剥离和沉积作用以及径流的选择搬运作用共同决定了侵蚀泥沙的团聚体组成特征。

2.2 团聚体氮磷含量及其富集作用

同一时段的各粒径团聚体的氮磷含量有显著差异;团聚体含氮量与其粒径的关系遵循下列规律(表4):(<0.045 mm)>(>0.5 mm)>(0.5~0.25 mm)>(0.25~0.1 mm)>(0.1~0.045 mm);团聚体含磷量与其粒径的关系遵循下列规律(表5):(>0.5 mm)>(0.5~0.25 mm)>(<0.045 mm)>(0.25~0.1 mm)>(0.1~0.045 mm)。总之,粒径<0.045 mm 的团聚体含有较高的氮磷养分,0.1~0.045 mm 团聚体氮磷含量最低。这一现象与一般结论是不完全一致的。通常情况下,粒径越小,团聚体氮磷含量越高[8]。可能原因是本实验土壤因常施家禽粪,径流中富含粗颗粒有机质,过筛时留在粗团聚体中,使大于0.25 mm 粒径的团聚体均有较高的氮磷含量。

表4 不同时段的侵蚀泥沙及不同粒径团聚体含氮量(g kg⁻¹)

时间(min)	泥沙	SD[1]	团聚体粒径(mm)									
			>0.5	SD	0.5~0.25	SD	0.25~0.1	SD	0.1~0.045	SD	<0.045	SD
8	3.53	0.355	4.79	0.566	3.58	0.297	2.91	0.506	2.02	0.694	4.17	0.358
17	2.83	0.296	3.14	1.017	2.59	0.244	2.45	0.335	1.80	0.277	3.94	0.278
26	2.17	0.354	2.79	0.580	1.92	0.114	1.54	0.321	1.19	0.112	3.70	0.358
35	2.26	0.392	2.82	0.346	2.24	0.490	1.84	0.218	1.59	0.818	3.52	0.730
44	1.96	0.099	2.85	0.530	2.38	0.293	1.73	0.255	0.87	0.194	3.44	0.351

1) SD 为标准差

表 5　不同时段的侵蚀泥沙及不同粒径团聚体含磷量(g kg^{-1})

时间 (min)	泥沙	SD[1)]	团聚体粒径(mm)									
			> 0.5	SD	0.5~ 0.25	SD	0.25~ 0.1	SD	0.1~ 0.045	SD	< 0.045	SD
8	3.14	0.318	4.53	0.421	4.09	0.441	2.79	0.257	2.03	0.122	2.95	0.233
17	2.73	0.355	4.22	0.936	3.61	0.220	2.56	0.281	1.55	0.159	2.71	0.269
26	2.26	0.294	3.94	0.821	3.14	0.441	2.19	0.086	1.40	0.147	2.52	0.294
35	1.98	0.220	3.85	0.799	3.03	0.404	2.03	0.135	1.11	0.049	2.45	0.282
44	1.83	0.380	3.70	0.714	2.78	0.306	1.82	0.294	0.99	0.110	2.33	0.343

1) SD 为标准差

利用不同粒径团聚体氮磷含量和对应的重量百分数, 加权计算得到不同时段侵蚀泥沙的氮磷含量, 高于原土壤的氮磷含量, 表现出对氮磷的富集。不同粒径团聚体对侵蚀泥沙富集氮磷的作用是不一样的; 平均而言, 小于 0.045 mm 粒径团聚体所起的作用最大, 分别为 44%、32%, 高于其它粒径的团聚体。> 0.5 mm、0.5~ 0.25 mm 的团聚体虽然有较高的氮、磷含量, 但其团聚体重量含量低, 所以其贡献最低, 同时也说明径流选择搬运有机质对侵蚀泥沙富集氮磷的作用有限; 0.25~ 0.1 mm、0.1~ 0.045 mm 团聚体有较高的重量含量, 但其团聚体氮、磷含量较低, 所以其贡献也较低。尽管如此, 0.25~ 0.1 mm、0.1~ 0.045 mm 两个粒径团聚体的氮和磷浓度之和达到了侵蚀泥沙氮、磷含量的 34% 和 37%。因此, 径流有 78% 的颗粒态氮和 69% 的颗粒态磷是通过粒径 0.25 mm 以下的团聚体的迁移而流失的。

2.3　侵蚀泥沙氮磷富集系数及变化规律

图 3 表示氮、磷富集系数(ER_N、ER_P) 与收集侵蚀泥沙时间的关系。由于被侵蚀剥离的土壤颗粒内外层氮磷养分含量存在梯度[9], 被剥离的外层养分含量较高, 随降雨径流的延续, 选择搬运的泥沙逐渐变粗, 团聚体及侵蚀泥沙氮磷含量随时间表现出下降的趋势(表 4、表 5) ; 因此, 侵蚀泥沙 ER_N 和 ER_P 都随侵蚀过程的延续而下降。前面已经分析, 侵蚀地表的少量有机质对侵蚀泥沙的富集系数的影响是有限的; 同时, 原土壤中细颗粒团聚体含量很低; 原土壤中细颗粒团聚体氮磷含量并不比其它粒径团聚体高, 相反, 粗颗粒团聚体氮磷含量稍微高些(表 2) 。所以, 侵蚀过程中大颗粒团聚体的剥离分散和选择细颗粒团聚体是侵蚀泥沙富集氮磷养分和富集系数随时间下降的主要原因。

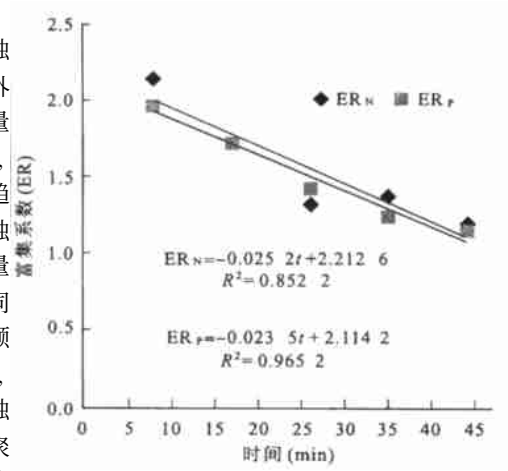

图 3　侵蚀泥沙富集系数 ER_N、ER_P 随时间的变化

3　结　论

雨强 72 mm h^{-1}、历时 44 min 的室内模拟降雨径流试验表明: 1) 在特定的土壤和降雨径流条件下, 侵蚀泥沙的重量组成中有 81% 是小于 0.25 mm 的团聚体, 大大高于原土壤的 16%; 而> 0.25 mm 的团聚体只有 19%, 远远低于原土壤中的 84%。2) 径流中 78% 的颗粒态氮和 69% 的颗粒态磷是随粒径 0.25 mm 以下的团聚体流失的, 44% 的颗粒态氮和 32% 的颗粒态磷是随粒径< 0.045 mm 的团聚体流失的; 侵蚀泥沙中粒径< 0.25 mm 的团聚体, 尤其是氮磷含量较高的< 0.045 mm 团聚体的富集是侵蚀泥沙对氮磷富集的主要原因。

参考文献

1. Sharpley A N. The selective erosion of plant nutrients in runoff. Soil Sci. Soc. Am. J., 1985, 49: 1 527~ 1 534
2. Flanagan D C, Foster G R. Storm pattern effect on nitrogen and phosphorus losses in surface runoff. Trans. ASAE, 1989, 32:

535~ 544
3. 黄满湘, 章申, 唐以剑. 模拟降雨条件下农田径流中氮的流失过程. 土壤与环境, 2001,10(1):6~ 10
4. Endecotts L T D. Test Sieving Manual. London: Jupiter Press, 1981
5. 中国土壤学会农业化学专业委员会编. 土壤农业化学常规分析方法. 北京:科学出版社, 1983. 79~ 81
6. Ghadiri H, Rose C W. Sorbed chemical transport in overland flow: Ⅰ. A nutrient and pesticide enrichment mechanism. J. Environ. Qual., 1991, 20:628~ 633
7. Palis R G, Okwach G, Rose C W, *et al*. Soil erosion processes and nutrient loss: Ⅰ. The interpretation of enrichment ratio and nitrogen loss in runoff sediment. Aust. J. Soil Res., 1990, 28:623~ 639
8. Wan Y, El-Swaify S A. Sediment enrichment mechanism of organic carbon and phosphorus in a well-aggregated Oxisol. J. Environ. Qual., 1998, 27: 132~ 138
9. Gross C M, Angle J S, Hill R L. Runoff and sediment losses from tall fescue under simulated rainfall. J. Environ. Qual., 1991, 20: 604~ 607

《土壤学报》被引用指标

依据中国科技期刊论文与引文数据库(CSTPCD),对《土壤学报》2001 年度影响因子和总被引频次等文献计量指标进行计算,结果和排名如下:

影响因子:0.758
在农业类中列在第 2 位
在 1447 种中国科技论文统计源期刊中列在第 65 位

总被引频次:776
在农业类中列在第 4 位
在 1447 种中国科技论文统计源期刊中列在第 61 位

2001 年度期刊影响因子分类排序表(农业类前 10 名)

名次	期刊名称	总被引频次	影响因子
1	水土保持学报	516	1.097
2	土壤学报	776	0.758
3	中国农业科学	1045	0.654
4	作物学报	1055	0.587
5	中国水稻科学	352	0.530
6	园艺学报	795	0.528
7	棉花学报	235	0.479
8	土壤	296	0.471
9	茶叶科学	127	0.460
10	水土保持通报	249	0.405

以上数据均摘自 2002 年版《中国科技期刊引证报告》