

黄土高原淤地坝土壤性质剖面变化规律及其功能探讨

王云强^{1,2}, 张兴昌^{1,3*}, 韩凤朋^{1,2}

(1. 中国科学院水利部、西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 西北农林科技大学资源与环境学院, 杨凌 712100)

摘要:为分析淤地坝土壤性质的剖面变化规律及其在非点源污染工程治理方面的可能性, 采用经典统计学方法研究了黄土高原典型淤地坝土壤性质在 5.20 m 剖面上的变化规律, 并探讨了淤地坝作为碳储存库以及养分富集库的独特功能. 结果表明, ① 坝前土壤剖面容重、砂粒含量低于坝尾, 而土壤含水率、有机碳、粘粒、粉粒、速效磷、硝态氮以及铵态氮均大于坝尾; 容重随剖面的变异情况为弱变异性, 其余指标为中等变异性; 除坝前砂粒含量和坝尾土壤含水率外, 其余指标均呈正态分布; ② 坝前和坝尾剖面土壤含水率随土层深度的增加均呈锯齿型变化趋势, 在剖面上的分布表现为波动型; 土壤有机碳、速效磷、铵态氮随剖面的变化规律与土壤水分的趋势相同; ③ 除坝尾容重与硝态氮、铵态氮及速效磷与铵态氮的相关性未达到显著水平外, 土壤含水率、有机碳、容重、粘粒、粉粒、砂粒、速效磷、硝态氮以及铵态氮之间的相关性均达到了显著水平 ($p < 0.05$), 并且坝前与坝尾剖面土壤各个性质之间所表现的正相关性或负相关性是一致的; ④ 淤地坝作为黄土高原的一个重要碳储存库, 坝前有有机碳储量高于坝尾, 且坝前在 400 ~ 520 cm 储量最高, 坝尾在 0 ~ 100 cm 储量最高; ⑤ 淤地坝对速效养分具有富集效应, 坝前储量大于坝尾, 且 2 个剖面上的储量大小顺序均为: 铵态氮 > 速效磷 > 硝态氮; 淤地坝对铵态氮、硝态氮的富集系数分别为 1.132 和 1.956; ⑥ 淤地坝作为土壤养分的富集库, 对区域碳平衡以及小流域非点源污染工程措施有效治理具有重要的理论意义, 对黄土高原坝系建设及其生态功能的深入认识具有一定的参考价值.

关键词:淤地坝; 土壤剖面; 土壤水分; 土壤有机碳; 空间变异性

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)04-1020-07

Profile Variability of Soil Properties in Check Dam on the Loess Plateau and Its Functions

WANG Yun-qiang^{1,2}, ZHANG Xing-chang^{1,3}, HAN Feng-peng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: To understand the profile variability of soil properties of check dam and its possibility of engineering control over non-point source pollution, we used classical statistics to characterize the profile change of soil properties of a 5.20 m depth soil profile in the typical check dam on the Loess Plateau. The roles of check dam as organic carbon storage and available nutrients storage were discussed. The results showed that: ① The bulk density and sand content of dam-head were lower than dam-tail, while, soil water content, silt, loam, organic carbon, available P, NO_3^- -N and NH_4^+ -N were higher than dam-tail. The bulk density for both dam-head and dam-tail showed weak variability while other properties showed moderate variability. All variables followed a normal distribution except sand in dam-head and soil moisture in dam-tail. ② The change pattern of soil moisture on the soil profile for both dam-head and dam-tail was saw-tooth type. The change trends of soil organic carbon, available P and NH_4^+ -N were comparable to that of soil moisture. ③ The correlations among soil water content, organic carbon, bulk density, silt, loam, sand, available P, NO_3^- -N and NH_4^+ -N were significant ($p < 0.05$) except the relationship between bulk density and NO_3^- -N, NH_4^+ -N and relationship between available P and NH_4^+ -N in dam-tail. The positive or negative correlation of soil properties both in dam-head and dam-tail were coincident. ④ The check dam can be an important carbon storage on the Loess Plateau, and the organic carbon storage in dam-head was higher than dam-tail. The storage of organic carbon in 400 ~ 520 cm depth was the biggest for dam-head, in 0 ~ 100 cm depths for dam-tail. ⑤ The check dam is an enrichment sink of available nutrients. The storage of available P, NO_3^- -N and NH_4^+ -N in dam-head were higher than dam-tail, and the range of storage was: NH_4^+ -N > available P > NO_3^- -N. The coefficient of enrichment for NH_4^+ -N and NO_3^- -N were 1.132 and 1.956, respectively. ⑥ As the sink of soil nutrients, check dam has an important theoretical value for region carbon balance, ecological environment reconstruction and the effective control over non-point source pollution.

Key words: check dam; profile soil; soil moisture; soil organic carbon; spatial variability

收稿日期: 2007-05-11; 修订日期: 2007-07-16

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2007CB106803); 国家科技支撑计划项目(2006BAD09); 西北农林科技大学科研创新团队支持计划项目

作者简介: 王云强(1981 ~), 男, 硕士, 主要研究方向为土壤性质空间变异, E-mail: wangyunq04@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhangxc@ms.iswc.ac.cn

淤地坝作为控制黄土高原水土流失、减少入黄泥沙、提高水资源利用效率、调节生源要素迁移、优化区域生态系统结构和功能以及实现生态环境良性循环的一项重要工程措施,具有蓄水保土效益、经济效益、生态效益和社会效益等多方面的效益,受到了科学家和政策制定者的普遍重视,成为水土保持科学研究的热点之一,并直接影响水土保持政策的制定^[1~3].同时,坝内泥沙对养分的富集功能已展现出它对非点源污染治理的潜在性,受到了部分环境科学家的关注^[4~6].

作为黄土高原的一项特色工程和独特景观,一些学者在对淤地坝减水减沙效益及其时间变化趋势^[7~10]、淤积规律及迁移动力学^[11,12]、淤积机理及模型化^[13]等水土保持效益研究的基础上,加强了对坝内泥沙的组成^[14]、坝地与两面沟坡的土壤水分和作物产量状况^[15]等经济效益方面的研究,取得了重要进展.然而,涉及淤地坝内泥沙沉积后土壤性质的剖面变化特征研究较少,而这对于黄土高原坝系农业的发展、坝系景观及稳定生态系统的构建具有一定的参考价值.此外,关于黄土高原淤地坝工程的生态环境效益研究鲜有报道,特别是淤地坝作为有机碳储存库以及水体富营养化元素(氮、磷)富集库方面.鉴于此,本研究以黄土高原典型淤地坝为对象,在坝前和坝尾分别挖取深为 5.20 m 的土壤剖面上,按照泥沙淤积的层次进行分层取样,分析坝地泥沙沉积后土壤基本性质的剖面变化特征,以期为指导区域粮食生产、构建坝系高产农业提供理论基础,并对淤地坝泥沙沉积后所具有的多种功能进行分析,探讨了淤地坝作为有机碳储存库以及水体富营养化元素富集库的独特功能和应用前景,这对黄土高原坝系建设、水土保持、区域碳平衡及小流域非点源污染工程措施有效治理具有重要的理论意义和应用价值^[16,17].

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为中国科学院水土保持研究所神木野外试验站附近的一个典型淤地坝(当地名为“老爷满”),该坝建于 1978 年,长 270 m、宽 86 m,坝前、坝中为高产农地,坝尾为盖度约 60% 的荒草地.该坝位于神木县以西 14 km 处的西沟乡六道沟小流域内,其控制区域为老爷满支沟,老爷满沟道面积为 0.56 km², > 100 m 的沟壑密度为 5.32 km·km⁻², > 20 m 的沟壑密度为 14.24 km·km⁻²,年侵蚀强度为

11 250 t·km⁻²,由于淤地坝位于老爷满支沟的沟头处,它几乎拦截了支沟内所有泥沙^[18].六道沟流域面积为 6.89 km², 110°26' E, 38°49' N, 年均气温 7 ~ 9 ℃, 年均降雨 437.4 mm, 降雨稀少而集中, 6 ~ 9 月可占全年降水量的 70% ~ 80%. 该流域北依长城, 地处毛乌素沙漠边缘, 水蚀、风蚀、重力侵蚀全年交替进行, 属于黄土高原水蚀风蚀交错带的强烈侵蚀区, 流域风沙地貌和流水地貌交错分布, 主要土壤类型有绵沙土、硬黄土、红黄土、风沙土和坝地淤土, 植被类型已逐渐发展成为以长芒草、草木樨状黄芪、达乌里胡枝子、茵陈蒿、柠条为主的演替阶段^[19].

1.2 采样及测定方法

为进行对比研究,在坝前和坝尾未受人为扰动的空地上,沿坝长方向挖取长为 2.5 m, 宽为 1.0 m, 深度分别为 5.14 m 和 5.22 m(为表达方便,文中统称为 5.20 m)的土壤剖面.根据坝内泥沙淤积的层次采用剖面刀进行分层取样,取样时尽量使每一土层高度范围内的土都能被取到,将鲜土样分别装于铝盒和塑封袋中,同时用卷尺量取每层的泥沙淤积厚度,对厚度 ≥ 5 cm 的土层,用环刀(直径为 5 cm, 高为 5 cm)在其中部位置取样以测其容重.经统计,坝前共划分为 64 层,坝尾为 42 层.采样时间为 2006-08-15 ~ 2006-09-08,其间仅有 1 次降雨,未产生径流.

将所有样品带回实验室,立即测定各土层的含水率(烘干法, 105 ~ 110℃ 烘 10 h)和容重(环刀法),对塑封袋内的土壤样品经风干,去除杂物,研磨,过不同粒径的尼龙筛(测定有机碳过 0.25 mm 筛,速效养分过 1 mm 筛,颗粒组成过 2 mm 筛),然后采用国家标准方法进行土壤指标的测定,其中有机碳含量采用重铬酸钾外加热法,速效磷采用钼锑抗比色法,硝态氮和铵态氮用 1 mol·L⁻¹ 的 KCl 浸提,流动注射分析仪测定,颗粒组成采用 MS2000 激光粒度仪-马尔文法.本研究采用 Excel 2000 和 SPSS 13.0 计算各变量的描述性统计特征值、Pearson 相关系数、正态分布检验及相关计算.

2 结果与讨论

2.1 淤地坝剖面土壤性质的统计分析

样本均值代表研究尺度内土壤数据的集中趋势,标准差和变异系数体现了土壤数据对中心位置的偏离程度,它们是分别对应于数据分布位置、分散情况、分布形状的量度^[20].表 1 为淤地坝剖面土壤性质的统计特征值.从中可见,坝前土壤剖面的平均

土层厚度、容重、砂粒含量低于坝尾,而相应土壤含水率、有机碳、速效磷、硝态氮、铵态氮、粘粒、粉粒的平均含量大于坝尾.造成这种结果的原因主要是坝前和坝尾相距 247 m,跨度较大,且坡度为 2°(用罗盘仪测定),在这样的地形状况下,当径流到达淤地坝后,被径流携带的泥沙在从坝尾到坝前的迁移运动过程中发生了的沉积现象,受重力和水流携沙能力的综合影响,大颗粒被运输的距离较短,通常在坝的中后部沉积,而细颗粒可迁移至坝前,于是在从坝尾到坝前的水平方向上形成了以砂粒-粉粒-粘粒为主的沉降次序;当水流运动停止后,泥沙在重力作用下沉积,并且是由粗至细逐级沉降落淤形成坝地土壤,一般是先为沙层,第 2 层为黄土层,第 3 层为灰

棕色的胶泥层,第 4 层为红胶土层,最后为含有机质特别丰富的淤积物薄层^[21].至此,一次降雨径流所携带的泥沙达到淤地坝后,在地形、重力和水流携沙力等因子的综合作用下,形成了淤地坝泥沙在水平和垂直方向上独特的分布格局.一个直接的结果就是使得到达坝前的泥沙总量较少(淤积厚度较小),且主要为细颗粒.细颗粒表面积较大,对土壤有机质具有较强的吸附作用,加之其颗粒间孔隙较小,对水分、溶质的保持力较强.正是由于坝前和坝尾颗粒组成的不同,导致了其土壤含水率、容重、有机碳、速效养分等土壤性质的显著差异.容易理解,在相同的淤积总厚度(5.20 m)下,坝前的土层数量大于坝尾的土层数量(见表 1),这与实际测量的结果相吻合.

表 1 淤地坝剖面土壤性质的统计特征值¹⁾

Table 1 Statistical characteristics of profile soil properties										
位置	项目	样本数	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数	偏度	峰度	分布类型
坝前	土层厚度/cm	64	0.80	55.8	8.04	8.16	101.46	3.74	18.75	NN(0.003)
	含水率/%	64	2.63	37.1	18.77	9.72	51.79	0.20	-1.07	N(0.556)
	有机碳/%	64	0.65	6.43	2.22	1.19	53.85	1.63	3.45	N(0.349)
	容重/g·cm ⁻³	38	1.10	1.50	1.34	0.11	7.87	-0.59	-0.34	N(0.724)
	速效磷/mg·kg ⁻³	64	2.3	10.1	5.73	2.10	36.62	0.15	-1.06	N(0.892)
	硝态氮/mg·kg ⁻³	64	0.54	12.76	3.75	3.12	83.31	1.31	0.65	N(1.620)
	铵态氮/mg·kg ⁻³	64	7.69	22.89	11.60	3.26	28.13	1.45	2.06	N(1.186)
	粘粒/%	64	2.06	24.02	12.13	6.09	50.24	0.10	-0.91	N(0.137)
	粉粒/%	64	32.93	83.97	69.10	11.25	16.28	-1.16	1.23	N(0.282)
坝尾	砂粒/%	64	4.23	65.01	18.66	15.35	82.30	1.23	0.73	NN(0.013)
	土层厚度/cm	42	2.60	47.70	12.43	10.60	85.23	1.61	2.19	N(0.081)
	含水率/%	42	2.09	23.28	5.68	4.43	78.11	2.68	7.44	NN(0.007)
	有机碳/%	42	0.22	2.61	0.94	0.51	54.14	1.43	2.23	N(0.086)
	容重/g·cm ⁻³	31	1.24	1.78	1.55	0.13	8.44	-0.13	-0.29	N(0.974)
	速效磷/mg·kg ⁻³	42	1.2	2.7	1.85	0.38	20.34	0.55	-0.32	N(0.892)
	硝态氮/mg·kg ⁻³	42	0.56	1.34	0.80	0.17	21.28	1.09	1.37	N(0.859)
	铵态氮/mg·kg ⁻³	42	5.83	9.65	7.29	0.89	12.25	0.69	0.41	N(0.670)
	粘粒/%	42	0.38	8.16	2.25	1.61	71.62	1.72	3.52	N(0.072)
	粉粒/%	42	10.26	68.66	30.64	15.54	50.74	0.80	-0.22	N(0.200)
	砂粒/%	42	22.95	88.03	66.12	16.34	24.70	-0.94	0.16	N(0.167)

1) NN 表示分布类型服从非正态分布,N 表示分布类型服从正态分布,括号内为 K-S 检验值

为了掌握淤地坝土壤剖面各层之间土壤性质与其均值的偏离程度,即剖面各层土壤性质之间的变异性,本研究选用变异系数(CV)作为其定量描述指标.根据 Nielsen 的划分标准,当 CV≤10% 时为弱变异性,当 10% < CV < 100% 时为中等变异性,当 CV ≥100% 时为强变异性.由表 1 可见,坝前土层厚度的变异系数最大,为 101.46%,表现为强变异性;坝尾土层厚度的变异系数次之,属于中等变异性.无论是坝前还是坝尾,容重的变异系数均最小,为弱变异性;而土壤含水率、有机碳、速效磷、硝态氮、铵态氮、粘粒、粉粒、砂粒均表现出中等变异性.土壤性质指

标的变异性主要取决于各指标自身的特性,而淤地坝作为一项重要的农业工程,除了在水土保持、减水减沙方面的显著作用外,其坝内淤积泥沙的变异性在一定程度上还与降雨、径流以及控制区域内土壤的理化性质、地形特征有关,当降雨径流频繁发生时,剖面土壤淤积的层次增多,势必会增大土壤性质的变异程度.

由统计学知识可知,土壤特性的变异系数与其分布类型具有一定的相关性,变异系数越大,数据表现出正态分布的可能性就越小.本研究采用 Kolmogorov-Smirnov(K-S)正态分布检验概率对剖面

土壤各层的土壤特性数据进行检验,结果表明:在95%的显著水平上,坝前土壤剖面中的土层厚度、砂粒含量以及坝尾土壤剖面的含水率均表现为非正态分布,而其余所测的土壤剖面性质指标均服从正态分布.

2.2 淤地坝土壤性质在剖面方向的变化规律

土壤是生物、气候、母质、地形和时间等自然因素和人类活动综合作用下的产物,其剖面的形成与成土过程密切相关^[22].受人类活动的影响,坝地淤土的形成过程与自然土壤有所不同,土壤性质在剖面上的变化亦有所差异.为此,本研究列出了淤地坝部分土壤性质沿土壤剖面方向的变化规律(图1).

由图1可见,坝前的土壤含水率随土层深度的增加呈锯齿型变化趋势,整体在70~140 cm深度含水率相对较低,在200 cm以下锯齿型变化更为剧烈,而坝尾土壤含水率随土层深度的增加表现为轻微的锯齿型变化趋势.根据文献[23,24]可知,土壤水分的剖面变化有4种情况:①上下层土壤含水率相等,梯度为零;②下层土壤含水率高于上层,梯度为正;③下层土壤含水率并不是总高于上层,梯度正负不确定;④下层土壤含水率低于上层,梯度为负,它们分别对应为土壤水分剖面变化的稳定型、增长型、波动型和降低型.据此可知,无论是坝前还是坝尾,淤地坝的土壤水分在剖面上均表现为波动型.

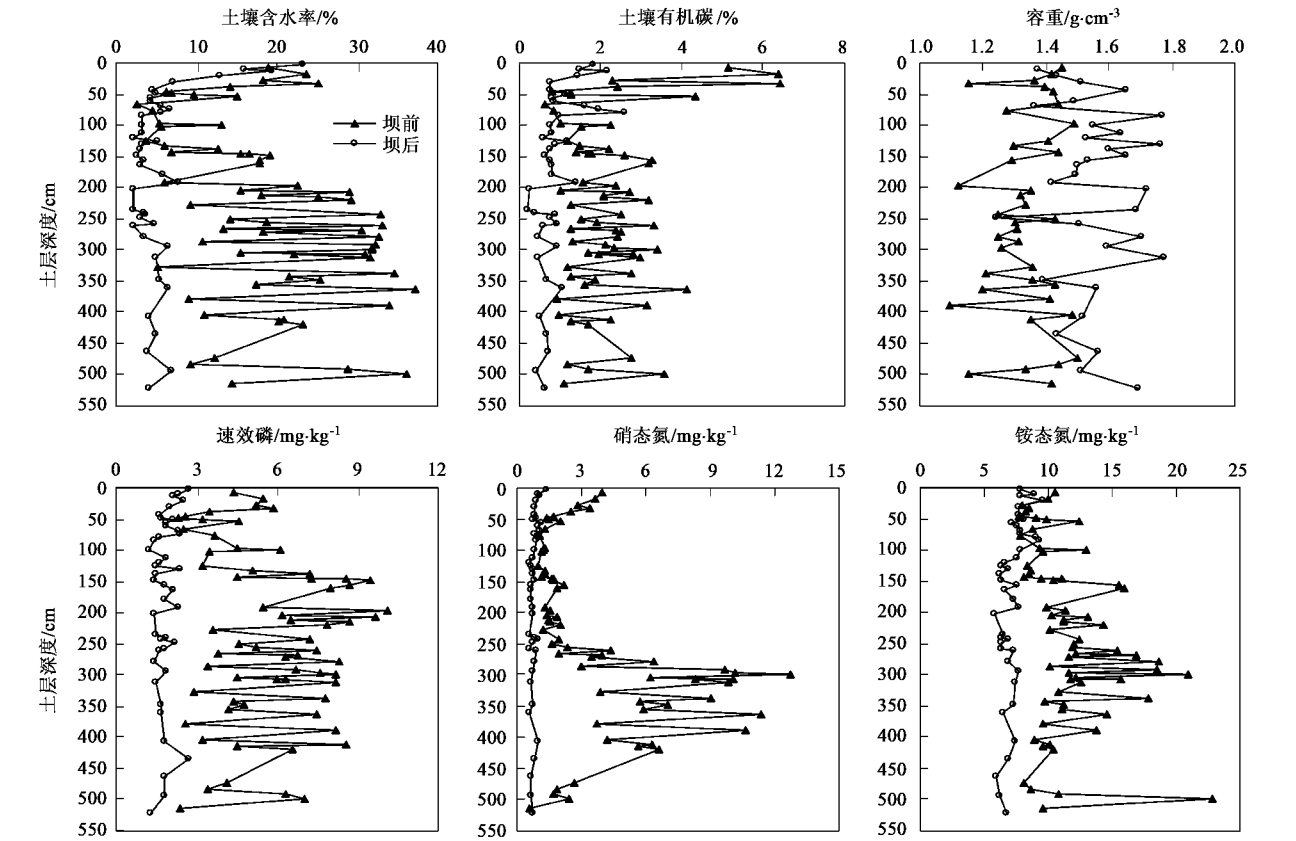


图1 淤地坝土壤性质的剖面变化规律
Fig.1 Changes of soil properties with soil depths

淤地坝土壤有机碳、速效磷、铵态氮随土层深度的变化规律与土壤水分的变化趋势相同,即坝前和坝尾土壤有机碳随土层深度的增加均呈现出锯齿型变化趋势,且坝前的锯齿型变化趋势较为剧烈.许多研究结果表明,无论是表层土壤还是深层土壤,土壤含水率与有机碳、速效养分含量之间具有显著的相关性^[25].类似地,笔者认为淤地坝这一特殊地貌的土壤含水率与有机碳、速效养分含量之间也具有显

著的相关性,这点将在下一部分的相关性分析中得到证实.从图1还发现,坝前的剖面土壤含水率、有机碳、速效磷、硝态氮、铵态氮、粘粒、粉粒含量均高于坝尾,其原因主要与坝控区域的气候状况、坝地土壤的成土过程、淤地坝地形特征有关.值得注意的是,坝前和坝尾硝态氮的剖面变化规律差异较大,坝前为锯齿型变化,并且在270~410 cm变化更为剧烈,整体含量也高,而坝尾的硝态氮整体水平较低,

并且随土层深度的变化其含量几乎不变,这主要与硝态氮所带的负电荷有关,此外,剖面上土壤含水率、砂粒、粘粒的含量及分布对硝态氮在剖面上的含量和分布也有一定影响.硝态氮及剖面土壤的这些特性表明硝态氮就有很强的迁移能力,无论是对地表径流还是对深层土壤和地下水体,均表现出较为明显的环境效应,在发生水体富营养化的水体中已被证明为主要的农业非点源污染物之一^[26,27].

对同一个土壤剖面,为掌握其各个土壤性质之间是否具有相关性及其显著性水平,表 2 列出了坝地土壤剖面各个性质之间的 Pearson 相关系数,从中可见,

坝前土壤剖面各个性质之间的相关性均达到了显著水平($p < 0.05$),且大多数已达到极显著水平($p < 0.01$).而在坝尾的土壤剖面上,除容重与硝态氮、铵态氮,速效磷与铵态氮的相关性未达到显著水平外,其余均达到了显著水平($p < 0.05$),大多数已达到极显著水平($p < 0.01$),此外还可以发现,坝前与坝尾土壤剖面各个性质之间所表现的正相关性或负相关性是一致的,比如,坝前土壤剖面的土壤含水率与有机碳之间的相关性为正,那么坝尾土壤剖面的土壤含水率与有机碳之间的相关性也表现为正,由此可知坝地土壤剖面性质在相关性关系上的一些共性.

表 2 淤地坝剖面土壤性质之间的 Pearson 相关系数¹⁾

Table 2 Pearson correlations of profile soil properties											
	样本数	含水率	有机碳	容重	粘粒	粉粒	砂粒	速效磷	硝态氮	铵态氮	
含水率/%	坝前	64	1	0.557 **	-0.675 **	0.592 **	0.561 **	-0.649 **	0.706 **	0.650 **	0.717 **
	坝尾	42	1	0.633 **	-0.446 *	0.780 **	0.658 **	-0.697 **	0.561 **	0.577 **	0.449 **
有机碳/%	坝前	64	1	-0.372 *	0.528 **	0.306 *	-0.447 **	0.437 **	0.278 *	0.360 **	
	坝尾	42	1	-0.496 **	0.700 **	0.708 **	-0.726 **	0.451 **	0.493 **	0.605 **	
容重/g·cm ⁻³	坝前	64		1	-0.600 **	-0.570 **	0.644 **	-0.712 **	-0.407 *	-0.588 **	
	坝尾	42		1	-0.462 *	-0.483 **	0.462 *	-0.600 **	-0.239	-0.138	
粘粒/%	坝前	64			1	0.520 **	-0.781 **	0.665 **	0.246 *	0.447 **	
	坝尾	42			1	0.945 **	-0.953 **	0.467 **	0.652 **	0.468 **	
粉粒/%	坝前	64				1	-0.939 **	0.687 **	0.266 *	0.495 **	
	坝尾	42				1	-0.984 **	0.423 **	0.616 **	0.508 **	
砂粒/%	坝前	64					1	-0.766 **	-0.292 *	-0.535 **	
	坝尾	42					1	-0.424 **	-0.619 **	-0.532 **	
速效磷/mg·kg ⁻³	坝前	64						1	0.310 *	0.542 **	
	坝尾	42						1	0.354 *	0.275	
硝态氮/mg·kg ⁻³	坝前	64							1	0.491 **	
	坝尾	42							1	0.483 **	
铵态氮/mg·kg ⁻³	坝前	64								1	
	坝尾	42								1	

1) * 表示相关系数在 0.05 的水平上显著(二尾检验), ** 表示相关系数在 0.01 的水平上显著(二尾检验)

2.3 淤地坝有机碳储量的剖面变化规律及碳库效应

降雨径流是淤地坝泥沙来源的动力,而泥沙是有机碳运输的载体.降雨的发生、泥沙的迁移和沉积、有机碳的储存等过程是相互联系、相互制约的,这些过程均具有时间和空间变异性.为分析坝前和坝尾剖面土壤有机碳储量的差异,本研究将土壤剖面划分为 5 个层次,即 0~100 cm、100~200 cm、200~300 cm、300~400 cm 和 400~520 cm,并做出了坝前和坝尾不同土层深度下土壤有机碳储量的分布(图 2).需要说明的是,由于坝前和坝尾的地面面积不同,文中采用单位面积(长 1.00 m、宽 1.00 m)来计算各土层的有机碳储量,然后将 100 cm 土层内的储量累加起来作为 1 层,共 5 层.由图 2 可见,坝前土壤有机碳储量在 400~520 cm 土层最高,其次为 0~100 cm,中间土层相对较低,而坝尾在 0~100 cm 的有机碳储量最高,200~300 cm 最低,也就是说,无

论是坝前还是坝尾,在剖面中间土层的有机碳储量均较低,其原因可能是:淤地坝中间土层淤积形成的时间大概是 1990 年左右,当时在国家政策的宏观调控下,该区域实行退耕还林还草政策,减少了土壤中有機物质如有机肥、绿肥的施入,而当时该坝控区域的土地利用方式主要为农地,有机物质输入项的减少势必会减小淤地坝剖面土壤有机碳的储量^[28,29].对比发现,坝前各层有机碳储量均比坝尾高,土壤有机碳储量的高低与土壤质地、容重、有机碳含量密切相关,而在黄土高原淤地坝这一特殊地貌下,坝前与坝尾在土壤质地、容重、有机碳含量等方面的显著差异是导致坝前和坝尾有机碳储量不同的主要原因.此外,由于坝前和坝尾土壤剖面特性、机械组成、水分状况等之间的差异,又会加大土壤氧化还原条件、微生物活性等方面的差距,这可能也是坝前和坝尾的各层土壤有机碳储量有所不同的一个原因.

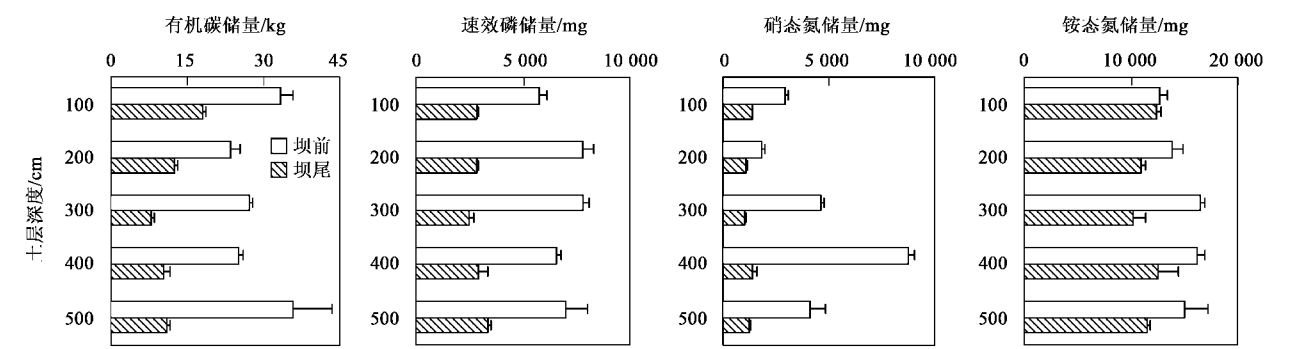


图2 不同土层深度土壤有机碳、速效磷、硝态氮及铵态氮的储量

Fig.2 Storage of organic carbon, available P, NO₃⁻-N and NH₄⁺-N in different soil depths

已有研究表明,在黄土高原地区广泛分布的以防洪拦沙、淤地为目的淤地坝是陆地生态系统的重要碳吸收汇之一.到2002年底,我国共建立了113 500座淤地坝,淤积了3 200 km²的高产农田,仅黄土高原地区淤地坝工程所增加的有机碳贮量为0.123 Gt,占1994~1998年全国大面积人工造林工程增加碳贮量的17.08%,是美国年沉积泥沙有机碳储量(0.04 Gt)的3.08倍^[3,30].本研究将单位面积各土层土壤有机碳储量累加起来,可得到坝前和坝尾在5.20 m³土体内的有机碳总储量分别为144.96 kg和60.14 kg,平均每m³土体的有机碳总储量分别为28.16 kg和11.51 kg,均比黄土高原每m³土体的有机碳储量要高.由此证明了淤地坝可以作为黄土高原的一个重要碳储存库,对区域和全球碳平衡具有重要意义.

2.4 淤地坝矿质氮、速效磷储量的剖面分布规律及其富集效应

受淤地坝可作为有机碳储存库的启发,笔者认为淤地坝对径流泥沙中的农业非点源污染物氮、磷也有一定的富集效应.为验证淤地坝是否具有这种功能,按照研究有机碳储量的方法,首先计算了淤地坝土壤速效磷、硝态氮、铵态氮在单位面积一定土层厚度下的储量,由图2可见,3种速效养分的储量均是坝前大于坝尾,在坝前或坝尾的同一剖面上,不同土层深度下各养分储量间的差异不大(坝前硝态氮除外),而从数值上看,其储量的大小顺序为:铵态氮>速效磷>硝态氮,造成这种差异的原因主要为:泥沙对带有正电荷的铵态氮具有较强的吸附性(吸附的强弱主要取决于泥沙的阳离子交换量、陪伴离子种类、以及径流中该养分离子的含量等),而对硝态氮基本没有吸附,加之在含水率较高的情况下坝地土壤易发生反硝化作用,使其进一步被淋洗损失或

迁移转化,泥沙对速效磷的吸附、固定等作用介于铵态氮和硝态氮之间.

经计算,淤地坝坝前和坝尾在5.20 m³土体内的速效磷、硝态氮、铵态氮的总储量分别为34.95 kg、22.21 kg、74.35 kg和14.38 kg、6.16 kg、57.66 kg,平均每m³土体的储量分别为6.72 kg、4.27 kg、14.30 kg和2.77 kg、1.18 kg、11.09 kg.与黄土高原的平均储量相比可以看出,黄土高原淤地坝土壤中速效磷、硝态氮、铵态氮的储量很高,具有一定的富集作用.富集系数(淤地坝土体元素/控制区域表层土壤元素的浓度)是表征淤地坝对养分富集水平的一个重要参数,通过计算淤地坝剖面与其控制区域表层土壤的硝态氮、铵态氮富集系数可知(表3),其相应的数值分别为1.132和1.956.富集系数大于1,说明淤地坝对该种养分具有富集效应,数值越大,富集能力越强.需要说明的是,坝控区域的元素浓度仅仅是0~20 cm深度,若将其扩大到0~500 cm,平均浓度势必会减小,那么所测的富集系数将会比表3的数值更大,淤地坝对养分的富集效应将会更加明显.对比可以发现,淤地坝土壤中硝态氮、铵态氮的浓度甚至比太湖地区某些地方的要高^[26],充分把握和利用淤地坝的养分富集功能(特别是氮、磷组分的富集),对黄土高原非点源污染治理、水体富营养化控制具有重要的参考价值^[31].

综上所述,加强黄土高原淤地坝建设一方面不仅是防止水土流失、减少泥沙输出、优化区域生态系统结构的一项重要工程措施;另一方面,淤地坝泥沙对养分的富集功能已充分证明了它在农业非点源污染治理方面的应用潜力.将淤地坝工程措施与坡面植被措施有机地结合起来,无论是对黄土高原水土流失与生态环境修复还是对黄河各流域的农业非点源污染有效治理,将是十分有益的^[27].

表 3 淤地坝部分土壤养分的富集系数

Table 3 Accumulation coefficients of soil properties in check dam				
项目	样本数 /个	硝态氮 /mg·kg ⁻¹	铵态氮 /mg·kg ⁻¹	有机碳 /g·kg ⁻¹
坝控区域	69	2.01	4.83	1.57
淤地坝	102	2.28	9.45	1.58
富集系数		1.132	1.956	1.004

3 结论

(1)坝前土壤剖面容重、砂粒含量低于坝尾,而其余所测指标大于坝尾;容重在剖面上的变异情况为弱变异性,其余指标为中等变异性;除坝前砂粒含量和坝尾土壤含水率外,其余指标均呈正态分布。

(2)坝前和坝尾剖面土壤含水率随土层深度的增加均呈锯齿型变化趋势,在剖面上的分布表现为波动型;土壤有机碳、速效磷、铵态氮随剖面的变化规律与土壤水分的趋势相同。

(3)坝前与坝尾剖面土壤各个性质之间所表现的正相关性或负相关性是一致的;除坝尾容重与硝态氮、铵态氮及速效磷与铵态氮的相关性未达到显著水平外,其余各指标之间的相关性均达到了显著水平($p < 0.05$)。

(4)淤地坝作为黄土高原的一个重要碳储存库,坝前有机碳储量高于坝尾,且坝前在 400 ~ 520 cm 储量最高,坝尾在 0 ~ 100 cm 储量最高。

(5)淤地坝对速效养分具有富集效应,坝前储量大于坝尾,且 2 个剖面上储量的大小顺序均为:铵态氮 > 速效磷 > 硝态氮;淤地坝对铵态氮、硝态氮的富集系数分别为 1.132 和 1.956。

(6)淤地坝作为速效养分的富集库,对区域碳平衡以及小流域非点源污染工程措施有效治理具有重要的理论意义和应用价值。

参考文献:

[1] 薛彩琴.浅析淤地坝工程效益[J].地下水,2006,28(3): 109-110.

[2] 毛战坡,王雨春,彭文启,等.筑坝对河流生态系统影响研究进展[J].水科学进展,2005,16(1): 134-140.

[3] Xu X Z, Zhang H W, Zhang O Y. Development of check-dam systems in gullies on the Loess Plateau, China[J]. Environmental Science & Policy, 2004, 7: 79-86.

[4] 王夏晖,尹澄清,颜晓,等.流域土壤基质与非点源磷污染物作用的 3 种模式及其环境意义[J].环境科学,2004,25(4): 123-128.

[5] 朱益玲,刘洪斌,江希流.江津市紫色土中 N、P 养分元素区域空间变异性研究[J].环境科学,2004,25(1): 138-143.

[6] 李兆富,杨桂山,李恒鹏.西苕溪流域土地利用对氮素输出影响研究[J].环境科学,2006,27(3): 498-502.

[7] 冉大川,左仲国,上官周平.黄河中游多沙粗沙区淤地坝拦截粗泥沙分析[J].水利学报,2006,37(4): 443-450.

[8] 焦菊英,王万忠,李靖,等.黄土高原丘陵沟壑区淤地坝的减水减沙效益分析[J].干旱区资源与环境,2001,15(1): 78-83.

[9] 焦菊英,王万忠,李靖,等.黄土高原丘陵沟壑区淤地坝的淤地拦沙效益分析[J].农业工程学报,2003,19(6): 302-306.

[10] 许炯心,孙季.无定河淤地坝拦沙措施时间变化的分析与对策[J].水土保持学报,2006,20(2): 26-30.

[11] 周赤建,朝伦巴根.红山水库淤积规律研究[J].泥沙研究,2005,1: 63-66.

[12] 金宝琛,杨极,吴铁华,等.闹得海水库冲淤规律分析[J].泥沙研究,2005,4: 41-47.

[13] 魏霞,李占斌,沈冰,等.陕北子洲县典型淤地坝淤积过程和降雨关系的研究[J].农业工程学报,2006,22(9): 80-84.

[14] 张晓华,潘贤梯,李勇,等.黄河中游干流泥沙组成规律[J].泥沙研究,1999,4: 70-74.

[15] 姚西文.纸坊沟流域淤地坝坝地水分环境与可持续发展[J].甘肃水利水电技术,2004,40(4): 384-387.

[16] 王佳宁,晏维金,贾晓栋,等.长江流域点源氮磷营养盐的排放、模型及预测[J].环境科学学报,2006,26(4): 658-666.

[17] 许其功,刘鸿亮,沈珍瑶,等.参数空间分布对非点源污染模拟的影响[J].环境科学,2007,28(7): 1425-1429.

[18] 刘玉民.中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊:第 18 集[C].西安:陕西科学技术出版社,1993.

[19] 王云强,张兴昌,从伟,等.黄土区不同土地利用方式坡面土壤含水率的空间变异性研究[J].农业工程学报,2006,22(12): 65-71.

[20] 张仁铎.空间变异理论及应用[M].北京:科学出版社,2005. 4-7.

[21] 黄河水利委员会绥德水土保持科学试验站.水土保持试验研究成果汇编(第二集)[Z].1985.

[22] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000. 7-8.

[23] 王军,傅伯杰,邱扬,等.黄土丘陵区土地利用与土壤水分的时空关系[J].自然资源学报,2001,16(6): 521-524.

[24] 黄奕龙,陈利顶,傅伯杰,等.黄土丘陵小流域地形和土地利用对土壤水分时空格局的影响[J].第四纪研究,2003,23(3): 335-343.

[25] Wang H Q, Hall C A S, Cornell J D, et al. Spatial dependence and the relationship of soil organic carbon and soil moisture in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico [J]. Landscape Ecology, 2002, 17: 671-684.

[26] 陈效民,吴华山,孙静红.太湖地区农田土壤中铵态氮和硝态氮的时空变异[J].环境科学,2006,27(6): 1217-1222.

[27] 张乃明,余扬,洪波.滇池流域农田土壤径流磷污染负荷影响因素[J].环境科学,2003,24(3): 155-157.

[28] 苏永中.黑河中游边缘绿洲农田退耕还草的土壤碳、氮固存效应[J].环境科学,2006,27(7): 1312-1318.

[29] 陈效民,邓建才,张佳宝,等.黄淮海平原主要土类中硝态氮水平运移规律[J].环境科学,2002,23(5): 96-99.

[30] 李勇,白玲玉.黄土高原淤地坝对陆地碳贮存的贡献[J].水土保持学报,2003,17(2): 1-5.

[31] 曲丽梅,姚德,丛不福.辽东湾氮磷营养盐变化特征及潜在性富营养评价[J].环境科学,2006,27(2): 263-267.