

渭河河床沉积物颗粒组成对渗透系数的影响

张波, 宋进喜, 曹明明

(西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127)

摘要: 正确认识河流沉积物颗粒组成与渗透系数之间的关系, 对于准确测算河床渗透系数具有重要的意义。以渭河中段为研究对象, 采用水头下降竖管渗透实验法对渭河中段 4 个河段的 43 个点位做渗透系数的原位测定, 获取各点位的垂向渗透系数(K_v)值。对测定点的沉积物样品进行了粒度分析, 并进一步分析了 K_v 与沉积物颗粒组成之间的相关关系。结果表明, 垂向渗透系数与其沉积物的含砂量以及砂土与黏土含量比值均呈指数正相关, 与黏土率呈指数负相关。研究获得的垂向渗透系数与沉积物颗粒组成的拟合方程为通过颗粒分析计算垂向渗透系数提供了依据。

关键词: 河床沉积物; 颗粒组成; 垂向渗透系数; 渭河

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)05-0040-05

中图分类号: P349

Effect of Sediment Particle Composition on Vertical Hydraulic Conductivity of Weihe River Streambed

ZHANG Bo, SONG Jin-xi, CAO Ming-ming

(College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China)

Abstract: An understanding of the relationship between particle size composition and vertical hydraulic conductivity(K_v) of streambed is of importance to estimate streambed K_v accurately. By taking the middle section of the Weihe River as the research object, the K_v values of streambed were derived by a falling-head standpipe permeameter test which was conducted at 43 locations of four sites along the river. Meanwhile, sediment samples in the locations were taken and particle size analysis of the samples was made. Then, the correlation between particle size composition and the K_v was analyzed. It can be concluded that the K_v had a positive correlation with sand content and the ratio of sand to clay particles in sediment, while they had a negative correlation with clay particles. The regression equation for the relationship between particle size composition and the K_v can provide reference for estimating the K_v of streambed in the Weihe River by the particle size analysis.

Keywords: streambed sediment; composition of particle size; vertical hydraulic conductivity; the Weihe River

河水的下渗对于维持地下水量的平衡起着重要作用, 其基本的影响参数为河床沉积物的渗透系数, 此参数直接影响着河流向含水层的入渗量和含水层向河流的排泄量^[1]。渗透系数是指水力坡度为 1 时的渗透速度, 是岩土透水性强弱的数量指标, 又称水力传导度^[2]。准确估算河床沉积物垂向渗透系数 K_v 值有助于了解地下水和河流之间水量交换以及水质运移的程度, 并能解决一系列相关的水文地质问题^[3-8]。研究表明, 河流沉积物渗透系数的大小与沉

积物组成颗粒的粒径分布呈现一定的规律性。不同的颗粒物粒径造成沉积物孔隙大小的差异, 从而决定水体下渗路径的通畅程度, 进而影响其下渗的速率。因此, 研究沉积物颗粒粒径与沉积物渗透系数的关系, 揭示其规律对渗透系数的预测具有重要的现实意义。国内外许多学者建立了粒度分布与渗透系数之间的经验公式如 Terzaghi 公式、A. Hazen 公式、Kozeny 公式等。Song 等^[9]通过对美国内布拉斯加州埃尔克霍恩河的研究认为, 这些经验公式由于其自

收稿日期: 2012-03-03

修回日期: 2012-11-13

资助项目: 国家自然科学基金项目“典型物理化学作用下河床渗透系数变化机理研究”(51079123); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目“河水—地下水交错带中水量交换过程及其响应机理研究”(NCET-11-1045); 教育部留学科研启动基金项目“渭河河床沉积物渗透系数变化特征及其响应机制”(教外司留[2010]1174)

作者简介: 张波(1980—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 博士研究生, 研究方向为水资源与水文学。E-mail: zhbwss@nwu.edu.cn。

通信作者: 宋进喜(1971—), 男(汉族), 甘肃省天水市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水文学、水资源及水环境研究。E-mail: jinxisong@gmail.com。

身的适用局限性问题,往往在通过粒度分布预测渗透系数上存在较大的偏差,有的则需要增加校正系数。不同的经验公式得出的渗透系数值也存在较大的差别^[10-14],一般认为,用颗粒物粒径公式计算渗透系数较适合于砂质或松散的沉积物,对黏土和淤泥渗透系数的计算适应性较差^[15-16]。因此,可以考虑将沉积物按照粒径划分不同的类型与渗透系数之间建立一种普适性较强的关系。Chen^[11]将河流沉积物按照粒径范围分为黏土、砂土及砾石,具体为:粒径 <0.075 mm 为黏土,粒径在 $0.075 \sim 2.0$ mm 的为砂土,粒径 >2.0 mm 为砾石。本文采用此分类方法将所采集的河底沉积物分类。通过分析,实验点的沉积物主要由黏土和砂土组成,砾石的含量非常低,有些样品甚至不含砾石,因此在初步分析时,砾石对本区的河水渗透系数的影响可以不计。本文主要研究黏土和砂土对渗透系数的影响,进而揭示其影响规律。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

渭河是黄河的最大支流,发源于甘肃省渭源县鸟鼠山,东至陕西省渭南市潼关县汇入黄河,全长 818 km,流域面积 1.34×10^5 km²,流域范围主要在陕西省中部。南有东西走向的秦岭横亘,北有六盘山屏障。渭河流域可分为东西二部,西为黄土丘陵沟壑区,东为关中平原区。渭河流域范围内大部分为深厚的黄土覆盖,质地疏松,且多孔隙,垂直节理发育,富含碳酸钙,易被水蚀。

本文研究对象渭河陕西段,由于渭河上游地区河流底质为基岩,无法进行渗透实验。因此本文选取渭河中下游的眉县(MX,河底村)、咸阳(XY,渭河 3 号桥下)、草滩(CT,西安)及临潼(LT,张庄村)4 个区段共计 43 个实验点,其中眉县 6 个、咸阳 7 个、草滩 20 个、临潼 10 个。

1.2 材料与方法

1.2.1 研究点位渗透系数的测定 本次测定实验于 2011 年 10 月进行。一般测定土壤渗透系数的方法分为常水头渗透实验和变水头渗透实验,本文采用后者进行水饱和土壤(河底沉积物)垂向渗透系数的测定。具体方案为:用水头下降立管渗透实验法测定沉积物垂向渗透系数,将一根长 160 cm,内径 5.4 cm 的上下开口薄壁的透明聚碳酸酯管垂直打入河床沉积物至 50~60 cm,通过人工往管子里注水,记录不同时间管子里的水头高度,以此来获取计算渗透系数 K_v 所需的各项参数(图 1)。运用如下公式^[3,17]进行垂向渗透系数的计算。

$$K_v = \frac{\pi D}{11m} + L_v \ln(h_1/h_2)$$

式中: K_v ——测点的垂向渗透系数(cm/s); D ——立管内径(cm), $D=5.4$ cm; L_v ——立管中沉积物的长度(cm); h_1 —— t_1 时刻立管内水头高度(cm); h_2 —— t_2 时刻立管内水头高度(cm)。 $m = \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$,其中 K_h ——沉积物的水平渗透系数。宋进喜等^[3]在美国霍恩河使用相同的方法测定渗透系数,通过分析认为 m 取值为 10。本研究中 $L_v/D \approx 10$,因此 $m=10$ 可能会引起误差值在 2% 左右。

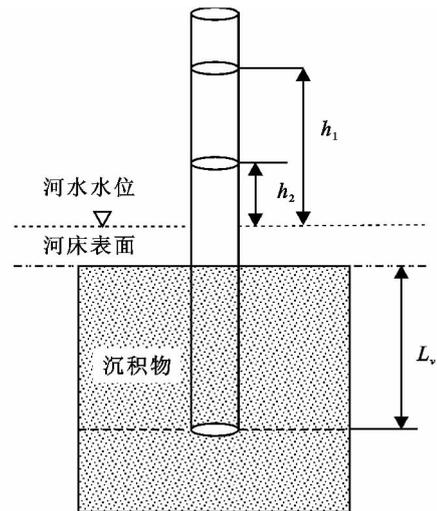


图 1 垂向渗透系数现场测定示意

1.2.2 沉积物粒径分析 在对渗透系数测定之后,用橡胶盖将立管上以方盖上以隔绝空气从沉积物拔出,取出沉积物装进采样袋带回实验室。在自然通风的条件下晾干、研磨、过筛用作粒度分析。按照粒径大小将沉积物划分为黏土、砂土和砾石。

2 结果与讨论

2.1 数据分析结果

通过对 43 个实验点位的渗透系数现场测定,并运用式(1)对测定结果进行计算得出各个点位的垂向渗透系数。将测定过渗透系数的沉积物带回实验室进行粒径分析并分类。各样点的垂向渗透系数及粒径分析结果见图 2。

渭河草滩(西安)点的沉积物 K_v 普遍较大(图 2),其值在 $1.817 \sim 42.377$ m/d,平均值为 22.245 m/d。其他各点位的 K_v 值由大到小依次为临潼、眉县和咸阳,其范围和平均值分别为 $0.449 \sim 5.812, 2.586; 0.380 \sim 0.588, 0.466; 0.074 \sim 0.512, 0.235$ m/d。

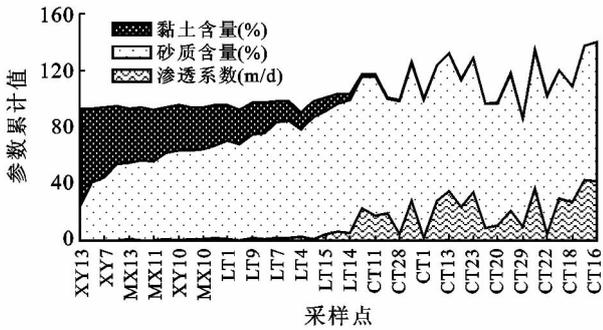


图 2 各采样点沉积物颗粒组成及渗透系数面积

注:采样点中XY, MX, LT 及 CT 分别指咸、眉、临潼和草滩;编号为各区域采样点的编号。

比较 4 个采样段沉积物的组成部分,含砂量的大小普遍为:草滩点>临潼点>眉县点>咸、阳点,其范围和平均值分别为 80.41%~97.77%和 92.25%, 65.67%~94.04%和 79.57%, 54.51%~67.73%和 61.08%, 23.13%~86.37%和 52.43%。黏土含量关系为草滩点<临潼点<眉县点<咸、阳点,其范围平均值分别为 0.13%~2.00%和 0.51%, 4.06%~28.00%和 16.00%, 24.24%~37.77%和 31.60%, 11.38%~69.94%和 42.18%。其中咸、阳部分沉积物中黏土比例比眉县小,但总体上眉县的黏土比例略小于咸、阳的。对比渗透系数和沉积物组分,由图 2 可以看出,渭河各采样段的垂向渗透系数 K_v 与其含砂量的大小关系一致,与黏土含量的大小关系相反。

通过以上对比分析可以看出,沉积物的垂向渗透系数与其颗粒组成存在一定的关系,即与沉积物的含砂量呈正相关,与黏土含量呈负相关。通过对测定数据绘制其线形回归图,得出拟合方程及其相关性系数。

渭河测点沉积物的垂向渗透系数与其含砂率呈正相关,与其黏土率呈负相关(图 3—4), R^2 分别为 0.683 2 和 0.756 1,属显著相关,并且沉积物含砂率和黏土率与垂向渗透系数均属于指数关系。但是,在含砂率接近的点位中(图 3 中含砂率 > 80%)其垂向渗透系数具有较大的差别,黏土率也同样存在这样的问题(黏土率接近 0)。通过对这些“异常点”的分析,产生这种现象的原因应该是在分析中忽略了沉积物中砾石(粒径 > 2.0 mm)的存在。采集的样品中砾石含量普遍较低,其范围在 0.78%~23.19%。通过分析发现存在“异常”现象的点位其砾石含量较高,同时黏土率都很低,这些点主要集中在眉县和草滩。 K_v 值与粒径存在正比例关系(图 3—4),含砂率相似的点位砾石含量增加和黏土率降低都可使 K_v 值显著的增加,同样在黏土率相似的点位砾石的比重多,其

K_v 值也会大于砾石比重小的点位。

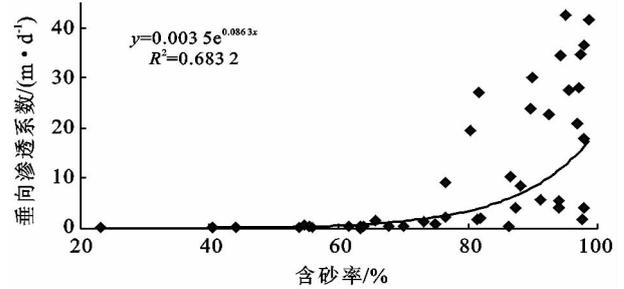


图 3 沉积物含砂率与垂向渗透系数指数关系

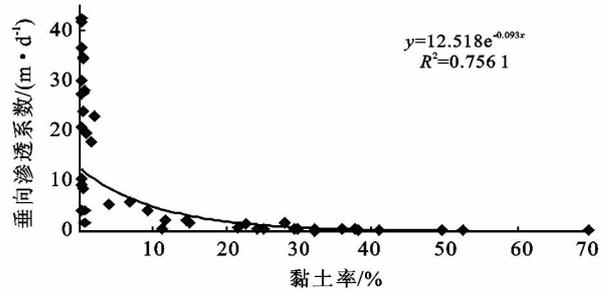


图 4 沉积物黏土率与垂向渗透系数指数关系

通过上述分析,含砂率与黏土率的比值即砂黏比(含砂率/黏土率)与垂向渗透系数 K_v 应该呈正相关,并且线性关系会增强。为了更好地反映河床沉积物组成与垂向渗透系数之间的关系,有必要对砂黏比(含砂率/黏土率)与垂向渗透系数 K_v 的关系作回归分析。

由图 2 可直观地看出,4 个研究区段中草滩的砂黏比最大。通过对数据分析 43 个点位中草滩有 20 个,其砂黏比均高于其他区段的 23 个点,范围为 47.23~763.06,平均为 290.51 其中 18 个砂黏比超过 100。其余 23 个点位中黏砂比范围为 0.33~23.17。平均为 4.42。由于草滩的砂黏比值过大,数目较多的草滩点位会对曲线拟合产生较大的影响,从而影响拟合方程的精度,产生较大的误差。因此,取草滩的 20 个点位 K_v 平均值(22.25 m/d)和砂黏比的平均值(290.51)与其他 23 个位点的 K_v 值和砂黏比值共 24 对数值作砂黏比值与 K_v 值的回归曲线(图 5)。

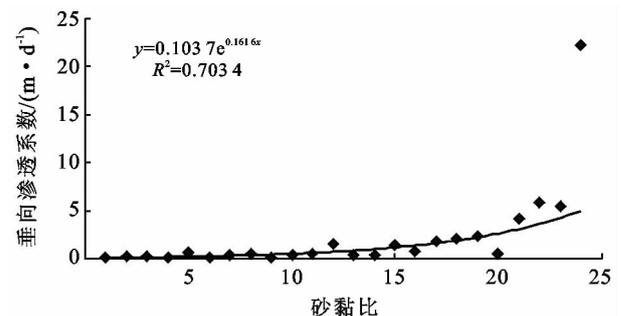


图 5 沉积物砂黏比与垂向渗透系数指数关系

图 5 显示 24 对 K_v 值和砂黏比值呈正指数变化,且 $R^2=0.7034$,拟合程度较理想。除第 20 个点位(咸阳)、第 23 个点位(临潼)和最后一个点位(草滩)外,回归方程对其余 21 个点位拟合程度较好。第 20 个点位砂黏比 7.59 位于第 4 位,但是其沉积物组成中砾石含量却只有 2.25%,位于 22 位(倒数第 3),这是使其 K_v 较小的原因。第 23 个点位其砂黏比位于第 2 位(仅次于草滩),但是其砾石含量 1.90% 位于第 24 位(倒数第 1),造成 K_v 值偏小的原因与第 20 个的原因相同。最后一个点位草滩其砾石含量达 7.25% 位于第 5 位,但是排在前面 4 位的黏土比例也很高,分别为第 6,7,13 和第 18 位,而草滩的黏土含量为 0.51%,排在 24 位,远远低于黏土含量排位 23 的 4.06% 和平均值 26.86%。因此,砾石含量高,黏土比例异常低是导致草滩测点砂黏比略高而 K_v 值异常高的原因。

2.2 讨论

由以上分析可以看出,沉积物颗粒不同组份与其垂向渗透系数之间均呈指数关系。其中, K_v 与含砂率及砂黏比呈正相关关系,与黏土比例呈负相关关系。从其相关性高度显著的结果看,沉积物的颗粒组成是影响垂向渗透系数的主要因素之一。但是,有些点位砾石含量和黏土含量显著高于或低于其他点位会导致 K_v 值过高或过低,说明粒径分布对 K_v 的影响起着关键作用,这与当前学者研究结论一致。Antônio 等^[18]在三种不同情况下研究了渗透系数与黏土含量的关系,结果表明其关系均为负指数关系。另外许多学者研究总结了渗透系数与粒径组成的经验公式,这些公式往往针对某一个或几个特定粒径参数来评估渗透系数的具体的值。这些公式难以与本文结果比较,但是从经验公式的形式上可以看出渗透系数与粒径大小呈正相关关系,从侧面印证了本文的部分结果。

河流地表水经由河床沉积物下渗到达地下实现其对地下水的补给或者承压水通过上渗补给地表水,其渗透速率的大小除与其压力差有较大的关系外,与其渗透过程路径的畅通程度有很大的关系。一般而言,沉积物颗粒粒径越大,其“骨架”作用越明显,其间的空隙率越大,水的渗透路径越畅通,渗透系数也就越大。沉积物的空隙是渗流的路径,空隙率是影响渗透系数的重要参数。大颗粒的“骨架”作用增加了沉积物的空隙率,从而有利于渗流过程。空隙率与颗粒形状排列组合有关,若小颗粒填在大颗粒之间的空隙中,则可降低空隙率^[19]。含有较大比例的砂质成分使沉积物有较大的空隙率,反之含有较大比例的黏土

的沉积物具有较小的空隙率,并且黏土由于其粒径较小,填充在大颗粒(砂土或砾石)空隙中产生“淤塞”作用,降低了沉积物的空隙率,从而影响水体的渗流过程。同时黏土具有较大的黏滞力,对水体运动具有一定的阻碍作用。因此,沉积物垂向渗透系数不仅与其组成颗粒大小有紧密的关系,同时还与其组成比例有较大的关系。本文采用原位测定方法获取渭河河床渗透系数,实验点位的水深、河流纵向比降不大,地下水位也没有太大差异,因此,沉积物的颗粒粒径就成为影响其渗透系数大小的主要因素。砂质沉积物其粒径大于黏土的粒径,因此,砂质沉积物的垂向渗透系数较大。河床沉积物 K_v 与含砂率呈正相关,而与黏土率呈负相关。由于影响 K_v 的因素较多,因此沉积物的渗透系数与其颗粒组成呈现出复杂的相关性。通过本文对渭河点位的研究,沉积物的垂向渗透系数与含砂率、黏土率及砂黏比(沉积物中砂土比例与黏土比例的比值)均呈指数相关。

3 结论

采用水头下降竖管法对渭河陕西段中下游 4 个区段的 43 个点位进行了河床垂向渗透系数的测定。渗透系数与其河床沉积物颗粒组成具有一定的关系,具体为:随着沉积物中砂质含量的增加其垂向渗透系数呈指数增长,沉积物中黏土含量增加其垂向渗透系数呈指数减小,且垂向渗透系数与沉积物中的砂质含量与黏土含量的比值呈指数正关系。沉积物中砂质与黏土比例相近时,砾石(大粒径)的含量会对 K_v 值产生较大的影响。同样,在砾石含量接近时细小的黏土(小粒径)比例差别也会对 K_v 值产生大的影响。所以,砾石和黏土含量较小时, K_v 值对其含量差别响应非常明显,会出现分析过程的“异常”现象。

[参 考 文 献]

- [1] 束龙仓, Chen Xunhong. 美国内布拉斯加州普拉特河河床沉积物渗透系数的现场测定[J]. 水科学进展, 2002, 13(5): 629-633.
- [2] 伍艳, 王玮屏, 任海平, 等. 水土作用对土体渗透系数的影响研究[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(6): 39-43.
- [3] 宋进喜, Chen Xunhong, Cheng Cheng, 等. 美国内布拉斯加州埃尔克霍恩河河床沉积物渗透系数深度变化特征[J]. 科学通报, 2009, 54(24): 3892-3899.
- [4] Boadu F K. Hydraulic conductivity of soils from grain-size distribution: new models [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(8): 739-746.
- [5] Landon M K, Rus D L, Harvey F E. Comparison of in-stream methods for measuring hydraulic conductivity in

- sandy streambeds [J]. *Ground Water*, 2001, 39(6): 870-885.
- [6] Conant Jr B, Cherry J A, Gillham R W. A PCE groundwater plume discharging to a river: Influence of the streambed and near-river zone on contaminant distribution [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2004, 73(1):249-279.
- [7] Kennedy C D, Genereux D P, Corbett D R, et al. Design of a light-oil piezomanometer for measurement of hydraulic head differences and collection of groundwater samples [J]. *Water Resource Research*, 2007, 43(9): 1029-2007.
- [8] Chen Xunhong, Burach M, Cheng Cheng. Electrical and hydraulic vertical variability in channel sediments and its effects on stream flow depletion due to groundwater extraction [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 352(3):250-266.
- [9] Song Jinxi, Chen Xunhong, Cheng Cheng, et al. Feasibility of grain-size analysis methods for determination of vertical hydraulic conductivity of streambeds [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 375(3/4):428-437.
- [10] Chen Xunhong. Hydrologic connections of a stream-aquifer-vegetation zone in south-central Platte River Valley, Nebraska [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 333(2):554-568.
- [11] Vukovic M, Soro A. Determination of Hydraulic Conductivity of porous media from grain size composition [M]. *Water Resources Publication LLC, Colorado*, 1992.
- [12] Milham N P, Howes B L. A comparison of methods to determine K in shallow coastal aquifer [J]. *Ground Water*, 1995, 33(1):49-57.
- [13] Odong J. Evaluation of empirical formulae for determination of hydraulic conductivity based on grain size analysis [J]. *Journal of American Science*, 2007, 3(3):54-60.
- [14] Vienken T, Dietrich P. Field methods of determining hydraulic conductivity from grain size data [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 400(1):58-71.
- [15] MacDonald A M, Maurice L, Dobbs M R, et al. Relating in situ hydraulic conductivity, particle size and relative density of superficial deposits in a heterogeneous catchment [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 434-435(20):130-141.
- [16] Chapuis R P. Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, 41(5):787-795.
- [17] Hvorslev M J. Time lag and soil permeability in ground-water observations, U. S. Army Corps of Engineers [R]. *Waterways Experiment Station Bulletin, Vicksburg, Mississippi*, 1951:1-50.
- [18] Antônio J R, Gérard D. Calculating hydraulic conductivity of fine-grained soils to leachates using linear expressions [J]. *Engineering Geology*, 2006, 85(1):147-157.
- [19] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制 [M]. 2 版. 北京:中国水利水电出版社, 2003.

(上接第 39 页)

- [8] 张富, 余新晓, 景亚安, 等. 黄土高原水土保持防治措施对位配置研究 [M]. 郑州:黄河水利出版社, 2007:291-322.
- [9] 赵克荣, 陈丽华, 肖洋. 黄土区径流调控技术体系 [J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6(4):94-99.
- [10] 赵西宁, 吴普特, 冯浩, 等. 黄土高原降雨径流调控利用潜力定量评价模型 [J]. *自然灾害学报*, 2009, 18(3):32-36.
- [11] 曹全意. 黄土高原地区提高山坡地径流利用率的有效途径 [J]. *水土保持研究*, 1998, 5(4):31-35.
- [12] 张永涛, 杨吉华. 集水措施下油松植树带微域环境的水量平衡分析 [J]. *水土保持学报*, 2003, 17(3):137-139.
- [13] 张富, 胡朝阳. 黄土高原植被对位配置技术研究 [J]. *中国水土保持*, 2003(1):20-21.
- [14] 张富, 高麟, 赵克荣. 水土保持植物措施与径流调控工程对位配置数量化分析 [J]. *甘肃农业大学学报*, 2011(4):97-104.
- [15] 朱正军, 赵克荣. 干旱半干旱区径流调控造林技术研究 [J]. *中国水土保持*, 2003(9):26-28.
- [16] 卫伟, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵沟壑区极端降雨事件及其对径流泥沙的影响 [J]. *干旱区地理*, 2007, 30(6):896-901.