

河床沉积物理化性质对渗透系数的影响研究 ——以渭河为例

王 珍, 宋进喜, 沈鹏云, 任朝亮, 于 芳

(西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127)

摘 要: 渗透系数在河流与地下水相互作用中起着至关重要的作用。沉积物中有机物、无机物的成分和含量多少, 均对渗透系数有影响。以渭河陕西段为研究区域, 采用竖管水头下降测试法对渭河中下游位于咸阳市、西安市草滩镇、西安市临潼区和华县 4 个研究区 2011 年的 63 个点位和 2012 年的 52 个点位沉积物垂向渗透系数(K_v)进行了测定。研究表明, 研究区 K_v 值在 0.23 ~ 18.74 m/d 之间, 其平均值为 5.13 m/d。 K_v 值在空间分布上呈现出在西安市草滩镇最大, 临潼区次之; 华县和咸阳市相差不大。通过皮尔森系数法进行 K_v 与沉积物理化性质的相关性分析, 得出在沉积物的理化指标中, 影响沉积物渗透系数的主要因子为锰、总磷、铁, 且有渗透系数随着其含量增大而增大的趋势。

关键词: 渭河陕西段; 渗透系数; 沉积物理化性质

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)05-0050-05

中图分类号: P641.2

Hydraulic Conductivity as Affected by Physical and Chemical Properties of Streambed Sediment —Taking the Weihe River as an Example

WANG Zhen, SONG Jin-xi, SHEN Peng-yun, REN Chao-liang, YU Fang

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

Abstract: Hydraulic conductivity is of importance to the hydraulic connection between surface water and groundwater and the water quantity exchange in hydraulic zone. The composition and content of organic and inorganic compounds in sediment may affect the hydraulic connection. The vertical hydraulic conductivity (K_v) for a streambed was measured by falling-head standpipe permeameter tests conducted in the four sites of Xianyang City, Caotan and Lintong area of Xi'an City, and Huaxian County in the lower reaches of the Weihe River in Shaanxi Province. The K_v values were between 0.02 and 61.32 m/d, with an average value of 5.13 m/d. Spatial distribution of sediment hydraulic conductivity indicates that the K_v value was the highest in Caotan area and then in Lintong area. The K_v values in Huaxian County and Xianyang City were relatively low and in Huaxian County, the lowest. Analysis of the correlations between the K_v value and sediment physiochemical properties was made using Pearson coefficient method. Among the sediment physiochemical indexes, manganese, total phosphorus and ferrous ion were found to be the main factors affecting streambed hydraulic conductivity and the effect increased with the increased hydraulic conductivity.

Keywords: Weihe River; hydraulic conductivity; sediment index

河流是全球水文循环过程中液态水在陆地表面流动的主要通道, 对物质、能量的传递和输送起着重要作用, 而地下水与河流之间存在着相互作用。研究表明, 河流与地下水之间相互作用发生在河床以下并

延伸至河岸带和侧向的可渗透的沉积区内, 称之为潜流带(hydraulic zone)。潜流带是表面水和地下水双向迁移和混合的区域^[1], 可以引起污染物的滞留, 河水中的污染物可能会进入潜流带的沉积物中, 同样

收稿日期: 2012-12-08

修回日期: 2013-01-09

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); 教育部留学回国人员科研启动基金“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: 王珍(1988—), 女(汉族), 甘肃省天水市人, 硕士研究生, 研究方向为水资源与水环境。E-mail: Wzhen5505@163.com。

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

沉积物中的污染物释放可能会引起上覆水的再次污染,这就是人们常说的河流二次污染^[2]。近十几年来,国际上对河床沉积物渗透系数野外试验高度重视并得到广泛研究。Landon 等^[3]和 Kelly 等^[4]采用不同测算方法进行对比分析;Springer 等^[5]和 Calve 等^[6]对所测算渗透系数值做了统计分析(包括变化范围,均值、误差及变化特点);Cardenas^[7]和 Kennedy 等^[8]基于内插法对渗透系数空间量值做了估算。对于某一河流而言,不同地点渗透系数值可以相差很大^[6]。Chen^[9]对美国 3 条河流不同断面上的渗透系数值做了试验测试,得出在里帕布利肯河和普拉特河不同断面上所获得的 K_v 平均值均比较相近,而在小布卢河不同断面上的平均值有较大差异。在中国黄河河床沉积物渗透系数的试验测试逐步得到专家关注与研究。王万杰等^[10],范晓梅等^[11],胡俊峰等^[12]分别使用原位渗透仪试验法对黄河部分河段河床沉积物渗透系数进行了测定。迟宝明等^[13]和尹立河等^[14]分别对暨阳湖和大克泊湖渗透系数进行了测定。此外,陈实等^[15]现场测定了海底沉积物渗透系数。定量研究河床沉积物渗透系数的空间变化,为研究地表水与地下水之间的水质与水量关系提供了有力支持,对维持河流健康有十分重要的意义。对于渭河,水污染严重,水质成分较为复杂,污染的河水下渗中水与沉积物间的化学动力作用会影响到河床渗透性的变化,因此,有必要从沉积物理化性质方面对渭河河床渗透系数空间变化机理进行深入研究。

1 研究区概况

渭河是黄河最大支流,发源于甘肃省渭源县西南的鸟鼠山北侧,流域涉及甘肃、宁夏、陕西 3 省,于陕西省潼关县注入黄河。总流域面积 $1.34 \times 10^5 \text{ km}^2$,

其中甘肃、宁夏、陕西的渭河流域面积分别占总流域面积 44.1%,6.1%,49.8%。干流全长 818 km,宝鸡峡以上为上游,河长 430 km,河谷川峡相间,河道狭窄,水流湍急;宝鸡峡至咸阳为中游,河长 180 km,河道较宽,多沙洲,水流分散;咸阳至潼关入黄口为下游,河长 208 km,水流甚缓,河道宽阔平缓且泥沙淤积严重。渭河是陕西关中地区生命河,关中地区的社会经济发展直接受到渭河流域生态环境健康的制约^[16]。近 20 a 来,由于工业废水和城镇生活污水入河排放量骤增,导致渭河全河段水质严重恶化。在陕西省境内,渭河 80% 以上的河段多年来处于劣 IV 类及 IV 类水质现状^[17]。随着社会经济的发展,陕西省沿渭河 4 大主要城市西安、宝鸡、咸阳和渭南从 20 世纪 80 年代开始就已大量开采地下水资源。由于渭河水受到严重污染,且渭河水与潜层地下水相互补给^[18],污染物超标的河水补给了浅层地下水,造成地下水的污染^[19]。同时,严重污染的沉积物对河流水质产生较大的影响,直接关系到用水安全。

2 材料与方法

2.1 研究区的选取

通过对渭河陕西段整个河段的野外考察调研,收集渭河气象水文、水质、河床泥沙(包括冲淤量)数据、沉积物特性、地下水位观测资料以及水资源开发利用、河床形态与演变方面的资料。通过对这些资料的分析,最终选取渭河中下游咸阳、临潼、西安草滩和华县 4 个具有代表性的研究区,在每个研究区沿水流方向布设多个测试点。各研究区试验时间、GPS 定位、布点数如表 1 所示,各研究区测试点布设情况如图 1 所示。对选定点位的河床做试验测试,测量并计算河床沉积物渗透系数。

表 1 各研究区试验时间、GPS 定位、布点数

研究区	试验时间	GPS 定位	布点数
咸阳市	2011-10-17, 2012-11-02	34°18'33.48" N, 108°40'36.96"E	25
西安市草滩镇	2011-11-19, 2012-11-01	34°22'28.63" N, 108°50'01.70"E	50
西安市临潼区	2011-10-18, 2012-10-13	34°25'13.52" N, 109°10'43.53"E	23
华县	2011-10-19, 2012-11-03	34°34'44.46" N, 109°40'35.14"E	17

2.2 河床渗透系数的测定

本次试验采样测定于 2011 年 10,11 月和 2012 年 10,11 月进行,采用变水头渗透试验方法测定沉积物渗透系数。具体过程为:将一根长 160 cm,外径 60 mm 的上下开口薄壁透明聚碳酸脂管子直立打入河床沉积物至 40~60 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,每个原位渗透测定

水位记录超过 4 次,以此来获取计算垂直渗透系数 K_v 所需的各项参数。用下面的公式^[20]计算 K_v 值:

$$K_v = \frac{\pi D}{11m} \frac{L_v}{t_2 - t_1} \ln(h_1/h_2)$$

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)。

依据 Chen^[9] 的研究结果,水平方向渗透系数值对水头影响不大。 $m = \sqrt{K_h/K_v}$,当 $L_v/D > 10$,取 $m = 1$ 或 $m = 10$,两者所计算的 K_v 误差值 $< 2.5\%$ 。沉

积物各向同性取 $m = 1$,沉积物异常各向异性取 $m = 10$ 。在此次研究中,沉积物原位测量时平均厚度为 46 cm,因而 $L_v/D \approx 8.5$,计算中,当 m 取值为 10 时,由此可能产生的误差较小,误差值 $< 3\%$ 。

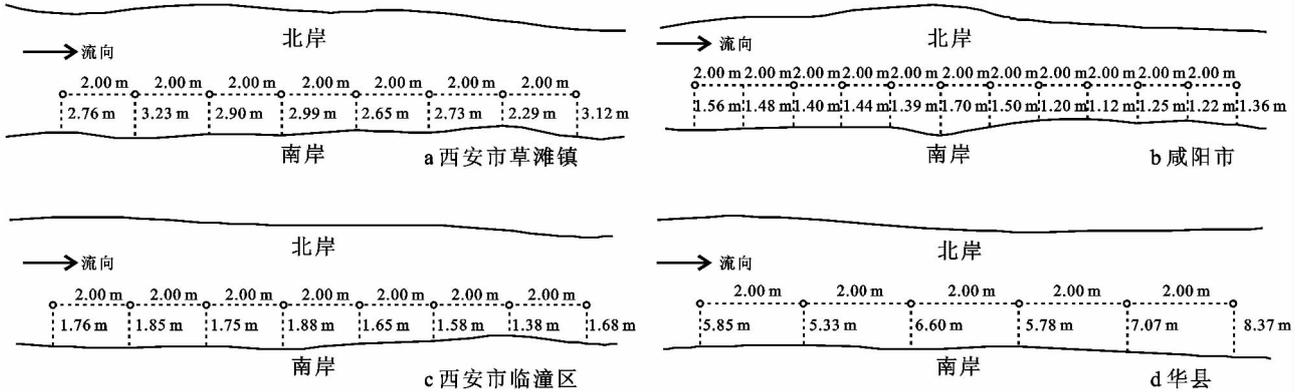


图 1 各测试区测试点位布设

2.3 沉积物指标测定分析方法

在渗透系数测定之后,用橡胶盖将立管上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。在自然通风条件下晾干、研磨、过筛做粒度分析和化学指标的测定,粒径 > 0.075 cm 的被归为粉沙和黏土,粒径在 $0.075 \sim 2$ cm 的为沙,粒径 > 2 cm 的为砾石。化学指标则采用现行的土壤指标国家标准对泥样进行分析。在 SPSS 中,采用皮尔森相关系数法^[21]对这些指标与河床渗透系数进行相关性计算。

3 结果与讨论

3.1 河床沉积物渗透系数分析

用式(1)对河床沉积物的渗透系数进行计算,所测沉积物厚度在 $37 \sim 59.00$ cm,平均厚度为 46.00 cm。 K_v 测定值在 $0.23 \sim 18.74$ m/d,平均值为 5.13 m/d。其中,草滩研究区河床沉积物 K_v 值范围在 $0.51 \sim 61.3$ m/d,均值 18.74 m/d;咸阳 K_v 值范围在 $0.02 \sim 1.17$ m/d,均值为 0.25 m/d;临潼 K_v 值范围在 $0.03 \sim 5.81$ m/d,均值为 1.31 m/d;华县 K_v 值范围在 $0.02 \sim 1.80$ m/d,均值为 0.23 m/d。沉积物 K_v 值在空间分布上呈现出西安草滩最大,临潼次之,咸阳和华县相差不大(表 2),可见对于同一河流而言,不同地点渗透系数值可以相差很大,这与 Calver^[6] 的研究结果一致。

大多研究者认为,由于洪水带来细小物质随着洪水消退形成淤积降低了河床表层沉积物渗透性能并进而降低了交错带水力交换能力^[22],沉积物中淤泥

淤积会阻塞河水垂直渗透。通过对野外试验取回的试样观察,在咸阳等渗透系数较小的测试点,发现竖管内的沉积物中有明显黑色淤泥淤积。河道形态在一定程度上也影响着渗透系数。在咸阳研究区,由于受 3 号桥及下游人工湖影响,流速减缓,淤积现象严重,渗透性能较差, K_v 值小至 0.02 m/d,基本不渗透;在华县研究区,由于研究河段河道较曲折,流速较缓,河流对沉积物的冲刷能力较弱,形成不同厚度的淤泥堆积,且含水量较大,形成了弱透水层,在测试中管内水头长时间内下降不明显, K_v 值普遍较小;在草滩、临潼试验点,研究区河道平直,流速较大,不易产生淤积,基本不存在淤泥淤积现象。因此,各个研究区所测得的渗透系数有所不同。

表 2 沉积物厚度及相应的 K_v 值

研究区	沉积物厚度/cm		K_v 计算值/($m \cdot d^{-1}$)	
	范围	均值	范围	均值
咸阳市	38.00~57.00	49.00	0.02~1.17	0.25
草滩镇	40.30~59.00	46.10	0.51~61.30	18.74
临潼区	40.90~57.00	47.90	0.03~5.81	1.31
华县	37.00~42.00	39.50	0.02~1.80	0.23
全部	37.00~59.00	46.20	0.02~61.30	5.13

3.2 K_v 值与沉积物理化性质相关性分析

影响河床沉积物渗透系数的影响因素较多。本文通过研究沉积物理化性质来体现其对渗透系数的影响。采用皮尔森相关系数法对这些指标与河床渗透系数进行相关性计算,通过 SPSS 相关分析,得到河床沉积物渗透系数与沉积物的理化性质的相关性系数(表 3)。

表 3 沉积物的理化性质与河床渗透系数相关性

分析因子	与 K_v 的皮尔森相关性	分析因子	与 K_v 的皮尔森相关性
铜	-0.609	汞	-0.668
锌	-0.201	总磷	0.891
铅	0.482	总氮	-0.172
镉	0.160	有机质	-0.432
铁	0.868	0.075~2	0.716
锰	0.933	>2	0.521
钾	-0.298	<0.075	-0.564

由皮尔森相关性分析结果看,沉积物理化性质指标中的铅、镉、铁、锰、总磷化学指标与 K_v 值的相关系数 $r > 0$,与河床渗透系数为正相关,即河床渗透系数呈随着河水中这些化学指标的含量的增大而增大的趋势。铜、锌、汞化学指标与 K_v 值的相关系数 $r < 0$,与河床沉积物渗透系数呈负相关性,即河床渗透系数呈随着河水中这些化学指标的含量的增大而减小的趋势。这是因为当沉积物中汞、铜、氮等的含量增大时,沉积物污泥因溶解和沉淀、氧化与还原、交替与吸附、成络与配位等作用膨胀而空隙减小,渗透性能降低,所以 K_v 值减小。在沉积物的化学指标中,影响沉积物渗透系数的主要因子为总磷、锰、铁且随着指标含量增大渗透系数有增大的趋势。这说明沉积物的化学性质是影响渗透系数的一个因素,但不能完全决定渗透系数的大小, K_v 值还与沉积物的物理指标有一定的关系。在沉积物的物理指标中,渗透系数与沉积物中的沙和砾石的含量呈正相关,与粉沙和黏土的含量呈负相关。

一般认为,河床沉积物渗透系数主要由沉积物颗粒大小所决定。大粒径含量较多的试验点,颗粒之间孔隙较大,水的渗透路径较畅通,河流通过沉积物颗粒进入河床的渗透率较大;小粒径沉积物具有较小的孔隙率,并且由于其粒径较小,颗粒在大颗粒中填充,在一定程度上会降低沉积物的渗透能力,当粒径很小的颗粒物大量堆积时就会产生淤塞。对采集样品的粒径分析表明,草滩研究区河床沉积物属于沙质堆积,大多为沙粒,沙质量百分比达到 92%,且存在较大的砾石,因而大颗粒与小颗粒混合后颗粒之间的孔隙较大,河流通过河床沉积物垂直下渗能力较强,试验时管内水头下降较快,该研究区的测量值较大;临潼研究区河床与草滩较为相似,沉积物中也大多为沙粒,沙质量百分比为 84%,但沉积物中并没有发现有较大粒径的砾石,小粒径的颗粒组合渗透能力较差,因而 K_v 值低于西安草滩;咸阳、华县研究区沉积物主要为粉沙和黏土,其质量百分比分别为 35%和

31%,细小沉积物在水的填充作用下形成弱透水性的淤塞层,渗透性能较差。因此,河床沉积物 K_v 值在粉沙和黏土等小粒径含量较少的研究河段(西安草滩、临潼)明显高于粉沙和黏土小粒径含量较多的研究河段(咸阳、华县),说明粒径大小对 K_v 的影响起着关键作用。分析结果与实测渗透系数大小基本符合,也与当前学者研究结论一致。因为每个研究区沉积物的理化性质和成因均有所不同,所以测定的 K_v 值表现出各自的变化规律,在草滩和临潼渗透系数随水流方向增大,而在咸阳研究区渗透系数随水流方向先减小后增大,眉县研究区呈现出随水流方向渗透系数减小的现象。

4 结论

对河床沉积物渗透系数及 K_v 值与沉积物理化性质相关性的分析结果表明, K_v 值在 0.23 ~ 18.74 m/d,平均值为 5.13 m/d,沉积物 K_v 值在空间分布上呈现出草滩镇测点最大,临潼区次之;华县和咸阳市相测点差不多。研究点 K_v 平均值分别为 18.74, 1.31, 0.23, 0.25 m/d。通过对 K_v 与沉积物理化性质的相关性分析得出,在沉积物的化学指标中,锰、总磷、铁,有随着其含量增大渗透系数增大的趋势;在沉积物的物理指标中,影响沉积物渗透系数的主要因子为沙和砾石,且有随着含量增大渗透系数增大的趋势。

[参 考 文 献]

- [1] Boulton A J, Findlay S, Marmonier P, et al. The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1998, 29(1): 59-81.
- [2] 金光球,李凌. 河流中潜流交换研究进展[J]. *水科学进展*, 2008, 19(2): 285-293.
- [3] Landon M K, Rus D L, Harvey F E. Comparison of instream methods for measuring hydraulic conductivity in sandy streambeds [J]. *Ground Water*, 2001, 39(6): 870-885.
- [4] Kelly S E, Murdoch L C. Measuring the hydraulic conductivity of shallow submerged sediments [J]. *Ground Water*, 2003, 41(4): 431-439.
- [5] Springer A E, Petroustou W D, Semmens B A. Spatial and temporal variability of hydraulic conductivity in active reattachment bars of the Colorado River Grand Canyon [J]. *Ground Water*, 1999, 37(3): 338-344.
- [6] Calver A. Riverbed permeabilities: information from pooled data [J]. *Ground Water*, 2001, 39(4): 546-553.
- [7] Cardenas M B, Zlotnik V A. Three-dimensional model of modern channel bend deposits [J]. *Water Resources Research*, 2003, 39(6): 1141-1152.

- [8] Kennedy C D, Genereux D P, Mitasova H, et al. Effect of sampling density and design on estimation of streambed attributes [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 355 (1/4):164-180.
- [9] Chen X H. Streambed hydraulic conductivity for rivers in south-central Nebraska [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2004, 40(3):561-573.
- [10] 王万杰,束龙仓,王志华. 河床沉积物渗透系数试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2007, 18(2):136-138.
- [11] 范晓梅,刘高焕,束龙仓,等. 黄河三角洲沉积环境和沉积物渗透系数的现场实验测定[J]. *水资源与水工程学报*, 2008, 19(5):6-10.
- [12] 胡俊峰,王金生,藤彦国,等. 黄河河床沉积物渗透性的试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2009, 20(3):25-28.
- [13] 迟宝明,束龙仓. 张家港暨阳湖湖底沉积物渗透系数的现场测定[J]. *吉林大学学报:地球科学版*, 2003, 33(4):539-541.
- [14] 尹立河,王晓勇,黄金廷,等. 大克泊湖床垂向渗透系数试验研究[J]. *盐湖研究*, 2011, 19(1):1-8.
- [15] 陈实,李海龙,孙萍萍,等. 一种现场测定海底沉积物渗透系数的新方法[J]. *地下水*, 2008, 30(4):113-116.
- [16] 宋进喜,李怀恩. 渭河生态环境需水量研究[M]. 中国水利水电出版社, 2004.
- [17] 郭巍. 水质水量结合评价渭河干流(陕西段)水资源变化[J]. *水资源与水工程学报*, 2011, 22(5):115-121.
- [18] 张博,洪梅,贾仰文,等. 基于 MODFLOW 的流域分布式水文模型研究:以渭河中下游地区为例[J]. *湿地科学*, 2009, 7(2):148-154.
- [19] 彭殿宝,周孝德. 渭河流域(陕西段)水体现状及水污染综合治理研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2010, 21(1):128-131.
- [20] Hvorslev M J. Time lag and soil permeability in groundwater observations [J]. *U. S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station Bulletin*, 1951, 36(3):1-50.
- [21] 赖国义,陈超. SPSS 17.0 中文版常用功能与应用实例精讲[M]. 北京:电子工业出版社, 2010.
- [22] Brunke M, Gonser T. The ecological significance of exchange processes between river and groundwater [J]. *Freshwater Biology*, 1997, 37(3):1-33.

(上接第 49 页)

(4) 多穴围绕白刺植株周边施肥、接种锁阳,锁阳的寄生、出土效果好于营养床施肥接种方式;锁阳接种量提高对锁阳寄生、出土率的提高具有积极效果。施肥、每穴小接种量,总接种量大对提高锁阳寄生出土率具有较好效果。

利用白刺实生苗接种锁阳的效果是很明显的。在理论和实践上都是新的突破,尤其是锁阳在接种后 1 a 多的时间就可产生寄生关系并出土,突破了在这之前从寄生到出土的时间上的认识。利用实生苗接种锁阳在定植白刺时就可接种锁阳,减少了后续的接种工作量,简化了生产操作程序,利于实施集约化、规模化锁阳的生产栽培^[8-9]。建议在实践中为了增加锁阳的产量,在接种锁阳后的第 3 a 或第 4 a 需要重新接种锁阳,才会保证锁阳的连续出土,保证产量的连续与稳定。

[参 考 文 献]

- [1] 苏格尔,李天然,刘基焕,等. 药用寄生植物锁阳的人工繁殖研究[J]. *内蒙古大学学报:自然科学版*, 1993, 24 (3):324-329.
- [2] 苏格尔,常艳旭. 锁阳的化学成分及药理作用研究概况[J]. *中国民族医药杂志*, 2005(6):46-50.
- [3] 刘睿杰,苏格尔,尹诚国,等. 提高锁阳种子萌发率的研究[C]// 中药材规范化种植研究研讨会论文集. 2004:486-489.
- [4] 李天然,苏格尔,刘基焕,等. 寄生药用有花植物锁阳在寄主体内的繁殖[J]. *内蒙古大学学报:自然科学版*, 1994, 25(6):673-679.
- [5] 苏格尔,李天然,刘基焕,等. 寄生药用植物锁阳种子的休眠原因及破坏休眠的途径的研究[J]. *内蒙古大学学报:自然科学版*, 1996, 27(2):214-218.
- [6] 苏格尔,刘基焕,骆蒙,等. 锁阳不同生育期营养成分的动态研究[J]. *内蒙古大学学报:自然科学版*, 1994, 25 (2):197-204.
- [7] 苏格尔,李天然,于彦珠,等. 寄生植物锁阳种子萌发抑制物质的研究[J]. *内蒙古大学学报:自然科学版*, 1995, 26(5):600-603.
- [8] 包玉英,苏格尔,李天然,等. 锁阳种子与吸气起源[J]. *内蒙古大学学报:自然科学版*, 1998, 29(4):552-557.
- [9] 骆蒙,苏格尔,刘基焕,等. 锁阳种子萌发条件的研究[J]. *中国草地*, 1993(2):62-64.