

小流域输沙模数多年总体状况的描述方法研究

李智广¹, 赵力毅²

(1.水利部 水土保持监测中心, 北京 100055; 2.黄河水土保持天水治理监督局, 甘肃 天水 74100)

摘要: [目的] 研究各种小流域输沙模数的多年观测数据分析法的优缺点和适用性, 为甄选描述多年输沙模数数据特征的科学方法提供借鉴。[方法] 针对 4 条小流域观测数据, 通过统计特征值、去极值算术平均值、侵蚀强度分级年数频率、盒须图等 4 种方法及其组合方法的比较分析, 研究具有广泛适用性和严格科学性的多年输沙模数描述方法。[结果] 统计学上的算术平均数、中值等难以表征多年输沙模数的集中性和一般水平。去极值算术平均值虽具有反映数据一般水平的趋势, 但损失了极端值及其对决策的信息价值。侵蚀强度分级年数频率反映了不同量级输沙模数数据在强度分级上的分布。盒须图可全面显示数据的集中程度、分散情况以及异常数据的数值与个数。[结论] 在表征小流域多年输沙模数数据特征上, 不同的方法各有优点和不足, 为全面、客观地描述其集中性和分散性, 可采用多种方法, 扬长避短、配合使用, 盒须图具有较好的客观性和适用性。

关键词: 小流域; 输沙模数; 多年总体状态; 描述方法; 多年平均值; 盒须图

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2021)04-0128-05

中图分类号: S157.1

文献参数: 李智广, 赵力毅. 小流域输沙模数多年总体状况的描述方法研究[J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 128-132. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.04.018; Li Zhiguang, Zhao Liyi. A study on description methods of sediment transport modulus in small watersheds [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(4): 128-132.

A Study on Description Methods of Sediment Transport Modulus in Small Watersheds

Li Zhiguang¹, Zhao Liyi²

(1. The Center of Soil and Water Conservation Monitoring, Ministry of Water Resources, Beijing 100055, China; 2. Tianshui Governance and Supervision Bureau of Yellow River Soil and Water Conservation, Tianshui, Gansu 74100, China)

Abstract: [Objective] The advantages, disadvantages and applicability of various analysis methods of multi-year observation data of sediment transport modulus in small watersheds were studied, in order to provide references for selecting scientific methods to describe the characteristics of multi-year sediment transport modulus observation data. [Methods] Based on the observation data of sediment transport modulus in four small watersheds, through the comparative analysis of four methods and their combinations, including statistical eigenvalue, de-extremum arithmetic mean, frequency of erosion intensity grade, and box-whisker plot, the description methods with wide applicability and objectivity were explored. [Results] The statistical arithmetic mean and median could hardly represent the concentration and general level of multi-year sediment transport modulus. Although the de-extremum arithmetic mean had the tendency of reflecting the general level of data, it sacrificed the extreme value and its information for decision-making. The frequency of erosion intensity grade reflected the distribution of data in intensity classification. Box-whisker plot could show the concentration, dispersion and the number of abnormal data. [Conclusion] Various methods have their own advantages and disadvantages in characterizing the multi-year observation data. In order to describe their

收稿日期: 2021-03-24

修回日期: 2021-06-04

资助项目: 国家重点研发计划课题“生态治理与生态文明建设生态技术筛选配置与试验示范”(2016YFC0503705); 全国水土流失动态监测项目和国家水土保持监测点优化布局项目(126216229000200002)

第一作者: 李智广(1966—), 男(汉族), 陕西省岐山县人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水土保持监管、监测、信息化、项目建设和科技研究。E-mail: lizhiguang@mwr.gov.cn。

通讯作者: 赵力毅(1961—), 男(汉族), 甘肃省会宁县人, 教授级高级工程师, 主要从事水土流失规律试验、水沙变化与水土保持效益研究。Email: hwtszly@163.com。

concentration and dispersion comprehensively and objectively, various methods can be used to make full use of their advantages and avoid their disadvantages. Box-whisker plot has good objectivity and applicability in displaying the multi-year data of small watershed.

Keywords: small watershed; sediment transport modulus; general situation of many years; description methods; multi-year average; box-whisker plot

以小流域为单元实施水土流失观测及其防治措施配置是中国在水土流失治理上的一项创造^[1],小流域年输沙量综合反映了小流域的自然地理条件、土地利用等人为活动、水土流失防治措施等状况。由于自然因素和人为活动等条件在年际间不可避免地发生着变化,输沙量就必然地受到影响,在年际间发生着变化,甚至出现相当大的差异。为说明某条小流域(甚至较大流域)多年输沙量的变化、比较多条小流域年度输沙量的差别,常常使用输沙模数来进行分析^[2-4]。在实际应用中,常常使用多年平均值、近几年(如近10 a)平均值等反映一个时期输沙模数的总体状况或一般水平,使用与多年平均值比较(如基本持平、偏小或偏大)、较近几年平均值偏小(或偏大)等反映某个年份输沙模数的多寡^[5-9]。但采用算术平均值计算得到的多年平均输沙量模数^[3],并不能表征小流域输沙模数总体的一般水平和极端的离散程度,因为小流域的输沙模数在年际间、多年内的变化异常大。本文基于中国观测历时较长、数据较完整的4条小流域的数据为对象,采用比较分析的方法,研究如何科学、全面地描述小流域在一个时期内输沙模数(即长历时的多年观测数据)的总体分布特征,以期对小流域输沙模数以及水土保持工作中类似的观测数据分析提供参考。

1 数据来源

1.1 数据对象小流域

1.1.1 吕二沟小流域 吕二沟是黄河流域渭河支流藉河右岸的一级支沟,属黄土丘陵沟壑区第三副区,位于甘肃省天水市南郊,东经 $105^{\circ}43'$,北纬 $34^{\circ}34'$,面积 12.01 km^2 ,海拔 $1\ 175\sim 1\ 707\text{ m}$,年均降水量 574.1 mm ,集中于5—10月,占全年的 83.3% 。吕二沟土地利用以有林地、其他草地和旱地为主,面积分别为 $5.95, 3.65$ 和 1.23 km^2 ,旱地及果园分布在西侧梁顶。水土保持措施主要为造林和梯田,面积分别为 5.95 和 0.23 km^2 。

1.1.2 罗玉沟小流域 罗玉沟是渭河支流藉河左岸的一级支沟,属黄土丘陵沟壑区第三副区,位于甘肃省天水市北郊,东经 $105^{\circ}30'\sim 105^{\circ}45'$,北纬 $34^{\circ}34'\sim 34^{\circ}40'$,面积 72.79 km^2 。年均降水量 462 mm ,其中7,8,9这3个月降水量占全年的 47.1% 、占汛期的

57.6% 。罗玉沟土地利用以旱地、有林地、其他草地和果园为主,面积分别为 $35.39, 14.58, 9.15$ 和 7.72 km^2 ,旱地与果园分布在沟道两侧,果园主要分布在流域下游,有林地主要分布在流域北边边界的山梁上。水土保持措施面积 44.88 km^2 ,主要为梯田、造林和淤地坝。其中,梯田 28.94 km^2 ,造林 14.58 km^2 。2座骨干淤地坝分布在流域上游,19座小型淤地坝集中在桥子东沟,坝控范围 4.12 km^2 。

1.1.3 桥子沟东沟和西沟小流域 桥子沟是罗玉沟下游左岸一级支沟,由东、西两条支沟构成,面积 2.45 km^2 ,年均年降水量 499 mm 。其中,桥子东沟呈半扇形,面积 1.36 km^2 ;桥子西沟呈羽毛状,面积 1.09 km^2 。东、西两沟的地貌特征、地质、土壤、植被等基本相似。桥子沟土地利用以有林地、果园、其他草地和旱地为主,面积分别为 $0.78, 0.77, 0.38$ 和 0.38 km^2 。其中,桥子东沟土地利用以有林地、果园和其他草地为主,面积分别为 $0.61, 0.33, 0.20\text{ km}^2$;桥子西沟土地利用以果园、旱地和其他草地为主,面积分别为 $0.44, 0.21, 0.18\text{ km}^2$ 。旱地、果园分布在流域内的坡地上,有林地分布在北侧边界的山梁上。桥子沟东沟水土保持措施面积 $1.111\ 7\text{ km}^2$,其中19座淤地坝的坝控范围 1.03 km^2 。桥子西沟水土保持措施面积 $0.362\ 1\text{ km}^2$,主要为造林和梯田,面积分别为 $0.189\ 2$ 和 $0.172\ 9\text{ km}^2$ 。

1.2 观测数据

4条小流域的输沙模数数据由天水水土保持科学试验站(黄河水土保持天水治理监督局)提供。其中,吕二沟水土流失观测始于1954年,但1954—1957年仅在汛期5—9月观测,1965—1975年中断。罗玉沟水土流失观测始于1985年,当年资料不全,年度统计资料始于1986年。桥子东沟和桥子西沟为对比试验小流域,东沟为治理沟,实施了较多的水土保持措施;西沟为对比沟,水土保持措施很少,年度统计资料始于1988年,但1996和1997年缺测。

2 研究方法及其结果

2.1 统计特征值分析

采用统计学的特征值,分析4条小流域输沙模数的集中性和分散性。其中,集中性的特征值主要为算术平均值、几何平均值和中值,变异性的特征值主要为

极差、标准差、离散系数和偏度系数,结果详见表 1。4 条小流域年输沙模数的算术平均值都明显小于标准差,离散系数都大于 100%、介于 130.86%~229.28% 之间;几何平均值更小于标准差,仅占标准差的 1/3.4~1/25.3;极大值是算术平均值的 5.3~10.5 倍,极小值仅占算术平均值的 1/225~1/49;最大值远远地大于极小值,极差几乎就等于最大值;总体分布呈显著的左偏态,显著地偏向数值较小的一侧。由此可知,①小流域多年输沙模数数据不稳定、不集中、相当分散,算术平均值、几何平均值和中值都不能反映多年数据的一般水平、不能表征小流域输沙模数分布的集中趋势。②极大值与极小值、次极大值与次极小值甚至第三极大值与第三极小值,都远远大于其他数据。极大值和极小值等这些极端值对算术平均值和几何平均值产生了极大的影响,极大值遮盖了许许多多的较小值,甚至掩盖了许多小于算术平均值的观测值;较小值全部淹没在了个别较大值之中,甚至淹没在了算术平均值之中。③4 条小流域多年输沙模数的分散程度以桥子东沟为最明显,次序为:桥子东沟>吕二沟>桥子西沟>罗玉沟。

表 1 4 条小流域年输沙模数统计特征值

特征参数	特征值			
	吕二沟	罗玉沟	桥子东沟	桥子西沟
数据个数	51	34	30	30
算术平均值	3 181.178	3 923.438	1 370.494	4 485.321
几何平均值	976.976	1 520.542	# NUM!*	1 498.951
中值	1 287	1 659	145.6	1 824.5
极大值	24 438	22 300	14 410	23 890
极小值	14.15	79.75	0	37.61
极差	24 423.85	22 220.25	14 410.00	23 852.39
标准差	4 854.724	5 134.351	3 142.337	6 217.844
离散系数/%	152.61	130.86	229.28	138.63
偏度系数	2.577 1	1.954 5	3.239 9	1.963 6

注:①因观测数据中有“0”,几何平均值返回错误值“# NUM!”,下同;②离散系数=标准差/算术平均值×100%。

2.2 去极值算术平均值分析

为避免个别极端值对多年输沙模数特征值的影响,采用统计上“去掉极端值”、然后分析算术平均值的方法,即:将多年输沙模数按大小排列,每次从两端成对地去掉一对或多对数据,分别计算剩余数据的算术平均值,结果详见表 2。

表 2 4 条小流域年输沙模数去极值算术平均值

使用数据/%	吕二沟		罗玉沟		桥子东沟		桥子西沟	
	年数/a	算术平均值	年数/a	算术平均值	年数/a	算术平均值	年数/a	算术平均值
100	51	3 181.178	34	3 923.438	30	1 370.494	30	4 485.321
95	49	2 811.998	32	3 469.285	28	953.744	28	3 951.144
90	45	2 406.082	30	3 188.203	26	667.080	26	3 441.902
80	41	2 123.079	28	3 005.218	24	547.651	24	3 150.283
70	35	1 789.294	24	2 648.692	22	428.940	22	2 841.177
60	31	1 628.487	20	2 249.555	18	192.825	18	2 409.889
50	25	1 392.320	18	2 062.728	16	196.744	16	2 317.519

注:“使用数据”是指用于计算的数据个数占数据总数的百分比,分别为 100%,95%,90%,80%,70%,60%,50%。

分析表 2 可知:①每去掉一对极大值和极小值,算术平均值就变小;去掉的越多,算术平均值越小。并一致趋向几何平均值和中值,或趋向于较小的观测数据。这说明:极个别的极大值对算术平均值产生了巨大的、严重的影响。②随着成对去掉极大值和极小值的对数增加,算术平均值之间的差距越来越小,或算术平均值趋向于稳定。这说明:4 条小流域多年输沙模数总体的一般水平趋向于较小的数值,或者广泛的分布集中趋向于较小的数值。③随着年份数量的增加,极端值对算术平均值的影响程度逐渐减弱。如:对吕二沟、罗玉沟和桥子西沟,在使用数据占比相同的情况下,算术平均值总是表现为:吕二沟<罗玉

沟<桥子西沟(因桥子东沟为治理沟,数据明显区别于其他 3 条小流域)。这说明极个别极大值对小流域多年输沙模数一般水平的影响随着统计年份数量的增加而减弱。

2.3 侵蚀强度分级年数频率分析

4 条小流域多年输沙模数的极大值大于 24 000 t/km²,极小值只有十几甚至为 0。对这类差值极大、分布很不集中的数据,难以采用一个合适的、类似等差数列“公差”的数值,按照等差间距分析年输沙模数落在某个范围的频度;或可采用一个合适的、类似等比数列“公比”的数值,按照等比间距分析年输沙模数落在某个范围的频度。为分析不同大小多年输沙模

数出现的频度,本研究借用水土保持工作中常用的、水力侵蚀强度分级的间距^[10],统计 4 条小流域多年输沙模数落入各等级的年份数量的频率,结果详见表 3。分析表 3 可知:①年输沙模数更多地分布在微度和轻度、中度等较低的强度等级,尤以微度为主。这说明年输沙模数主要分布在较低的侵蚀强度等级,强度等级越低,年份数量越多。②年输沙模数分布在微度和

轻度、中度等较低的强度等级的总频率大致相同。吕二沟为 76.47%,罗玉沟为 73.53%,桥子东沟为 80%,桥子西沟为 73.33%。这进一步说明研究区域的年输沙模数集中分布在微度、轻度和中度等较低的强度等级范围。③采用《土壤侵蚀分类分级标准(SL190-2007)》提出的水力侵蚀强度分级标准进行研究区域多年年输沙模数分布分析具有一定的合理性。

表 3 4 条小流域多年输沙模数侵蚀强度频率统计

侵蚀强度	吕二沟		罗玉沟		桥子东沟		桥子西沟	
	年数/a	频率/%	年数/a	频率/%	年数/a	频率/%	年数/a	频率/%
微度	22	43.14	12	35.29	24	80	13	43.33
轻度	13	25.49	8	23.53	0	0	3	10
中度	4	7.84	5	14.71	4	13.33	6	20
强烈	6	11.77	2	5.88	0	0	3	10
极强烈	4	7.84	5	14.71	2	6.67	3	10
剧烈	2	3.92	2	5.88	0	0	2	6.67

2.4 剔除异常值特征值分析

2.4.1 异常值分析 为全面反映某条小流域、比较分析多条小流域多年输沙模数数据的分布情况,制作 4 个小流域多年输沙模数分布的盒须图^[11](图 1)。由图 1 可知,4 条小流域多年输沙模数的异常值共 14 个,全部为各小流域的极大值与靠近极大值的数据。其中,温和异常值 4 个,包括吕二沟的 18 160 t/km²,罗玉沟的 15 290 t/km²,桥子西沟的 13 790 和 13 000 t/km²;极端异常值 10 个,包括吕二沟的 24 438 t/km²,罗玉沟的 22 300 t/km²,桥子东沟的 14 410,9 360,4 199,3 704,2 748 t/km² 和 2 529 t/km²,桥子西沟的 23 890 和 21 060 t/km²。由此可知:①盒须图提供了观测数据位置与集中性、分散性的基本情况和关键信息。例如,以盒须图的上四分位数和下四分位数为界,包含在其中的数据的集中性相对较好,分布在其外的数据更加地分散。②4 条小流域多年输沙模数的异常值全部为极大值和靠近极大值的数据。这说明 4 条小流域多年输沙模数总体上的一般水平应偏向较小的数据。③4 条小流域多年输沙模数极端异常值的个数比温和极端值的多近 3 倍。这说明在观测期内,4 条小流域不仅遭受异常情况,而且遭受到的异常情况更加极端,尤以桥子东沟更加突出。④4 条小流域多年输沙模数的分散程度以桥子东沟为最明显,次序为:桥子东沟>吕二沟>桥子西沟>罗玉沟。

2.4.2 剔除异常值的特征值 在剔除盒须图的极端异常值和全部异常值后,计算 4 条小流域输沙模数的

集中性和分散性特征值,结果详见表 4。由表 4 可知:①在剔除异常值后,4 条小流域多年输沙模数的集中性明显优于原始数据,剔除全部异常值后的集中性更加明显。算术平均值和几何平均值与标准差、极大值和极小值的差距都有所减小,占标准差的比例分别为 1/1.2~1/1.4,1/2.6~1/3.6;极大值是算术平均值的 3.8~5.8 倍,极小值占算术平均值的 1/172~1/37;分布总体呈左偏态,偏向数值较小的一侧。②与剔除盒须图的异常值后的特征值比较,处于盒须图下四分位数和上四分位数之间的数据的集中性更加明显,其算术平均值和几何平均值都大于标准差(除桥子东沟的几何平均值外),离散系数都小于 100%;尽管分布总体上仍呈左偏态、偏向数值较小的一侧,但偏度明显减弱。

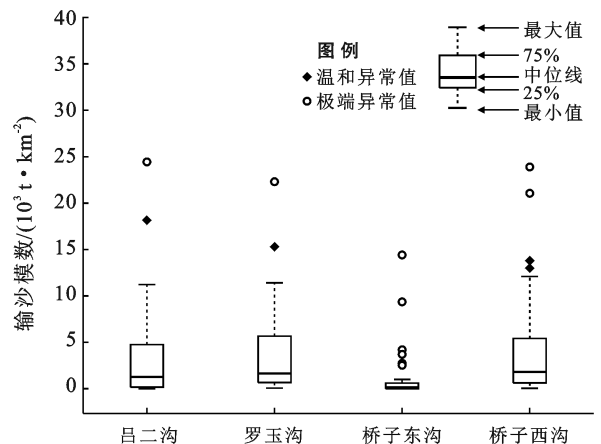


图 1 4 条小流域多年输沙模数盒须图

表 4 4 条小流域年输沙模数剔除异常值的统计特征值

特征参数	剔除异常值的特征值								盒须图下四分位数和上四分位数之间观测数据的特征值			
	剔除全部异常值				剔除极端异常值				吕二沟	罗玉沟	桥子东沟	桥子西沟
	吕二沟	罗玉沟	桥子东沟	桥子西沟	吕二沟	罗玉沟	桥子东沟	桥子西沟				
数据个数	49	32	—	26	50	33	24	28	25	16	14	14
算术平均值	2 441.675	2 993.965	—	2 416.140	2 756.041	3 366.572	173.534	3 200.344	1 392.320	1 925.131	180.622	2 216.471
几何平均值	861.881	1 300.847	—	1 028.603	916.053	1 401.702	# NUM!	1 235.536	1 069.118	1 669.105	122.043	1 774.497
中值	1 195	1 496	—	1 132.65	1 241	1 506	56.985	1 519	1 287	1 659	145.6	1 824.5
极大值	11 220	11 410	—	12 080	18 160	15 290	997.8	13 790	4 627	4 507	595.6	4 683
极小值	14.15	79.75	—	37.61	14.15	79.75	0	37.61	240	686.5	22.06	642
极差	11 205.85	11 330.25	—	12 042.39	18 145.85	15 210.25	997.8	13 752.39	4 387	3 820.5	573.54	4 041
标准差	3 147.100	3 479.847	—	2 825.089	3 826.673	4 038.875	248.724	3 961.349	1 003.715	1 066.974	158.816	1 441.449
离散系数/%	128.89	116.23	—	116.93	138.84	119.97	143.33	123.78	72.09	55.42	87.93	65.03
偏度系数	1.584 5	1.318 4	—	1.849 1	2.078 6	1.458 4	2.068 5	1.673 9	1.453 2	0.949 3	1.412 8	0.500 5

注:因桥子东沟小流域观测值只有极端异常值,就只计算“剔除极端异常值”的特征值,而不再重复计算“剔除全部异常值”的特征值。

3 讨论与结论

(1) 各种方法均有一定的适用性和明显的局限性。各种方法在描述多年输沙模数特征上各有优点、也各有不足,在表征其集中性、分散性、异常数据、总体状况、一般水平及其分布状态等方面的适用性存在明显差异。统计学上的集中性特征值,难以客观反映小流域多年输沙模数总体上的一般水平;观测期限越短,特征值越难以反映集中性。剔除的极值越多(包括极大值和极小值),集中性特征值越趋向小流域多年输沙模数的一般水平。观测期越长,极端值(尤其是个别极大值)对多年输沙模数集中性特征值的影响程度越小。侵蚀强度分级年数频率分析,既不剔除任何一个极大值和极小值,又采用不同间距划分所有观测数据,可反映多年输沙模数强度等级的分布情况。该方法可在同一量纲的前提下,反映观测期内各量级输沙模数出现的频率,为在总体上判断小流域输沙状态及沟道拦沙措施设计提供参考。盒须图既可反映全部数据的集中程度和分散情况,又可显示异常数据的数值及个数,能比较全面地反映多年输沙模数的总体状况、一般水平及其集中程度、分散情况。

(2) 为全面描述小流域多年输沙模数,可扬长避短,选用多种方法配合使用。对长历时的多年观测数据,既不可不加思索地忽视其中的异常值,又不能不加分析地把异常值直接用于统计分析,因为忽视异常值的存在十分危险,而异常值对统计结果有严重的影响。如何既能够利用所有观测数据、又能够多维度描述多年输沙模数的特征?从上述比较分析可知,多种

方法的配合使用或是一种较好的、折中的途径;或者,基于数据分布分析,扬长避短地选择使用某种方法。若要采用算术平均值描述小流域多年输沙模数的一般水平,其观测年份应更长,或许至少应大于 30 a 甚至 60 a,且越长越好^[12]。同时,应说明一般水平发生的概率、历史数据的分散状况(如极大值、极小值、标准差)^[13]。如:若观测历时为 100 a,就算是本研究的最大观测值 24 438 t/km²,其贡献仅为 24 438/100=244.38,就不会严重影响算术平均值。当观测历时较长时,在分析统计特征值时,可同时分析多年输沙模数对应侵蚀强度分级的年份数量频率,以表征小流域的平均侵蚀强度。在盒须图分析数据分散情况的基础上,使用统计学特征值进一步分析集中性,可更加全面地描述多年输沙模数的总体特征。

(3) 盒须图在显示小流域多年输沙模数上具有较好的客观性和适用性。盒须图没有对观测数据做任何的限制,图中的上边缘、上四分位数、中位数、下四分位数、下边缘以及温和异常值、极端异常值等,显示了多年数据的位置、集中性、分散性、极端情况等总体状态及其关键信息,真实直观地表现了数据分布的本来面貌。

上述观点不仅对分析小流域输沙模数多年观测数据具有参考价值,而且可供分析水土流失防治中其他常用数据时借鉴。如多年土壤侵蚀模数、土壤侵蚀强度、径流模数和径流含沙量,对以小流域为单元实施山水林田路综合治理、系统治理、分类施策,为建设高质量的小流域生态经济系统提供良好的信息产生积极作用^[14]。

(下转第 165 页)

- [9] 张俊云,李绍才,周德培.岩石边坡植被护坡技术(2):厚层基材的组成及特性[J].路基工程,2000(5):4-6.
- [10] 杨阳,杨建英,赵平,等.两种框格梁生态护坡技术及其应用效果:以安徽岳武高速公路为例[J].中国水土保持科学,2015,13(5):118-124.
- [11] 吕东旭.土工格室生态挡墙工程性状研究[D].陕西西安:长安大学,2003.
- [12] 闫峰.浅谈蜂巢约束系统护坡在中小河流域治理工程中的运用[J].林业科技情报,2014,46(2):64-65.
- [13] 梁爱学,李统益,王清茹,等.植生带边坡防护技术研究[J].公路交通科技(应用技术版),2007(4):163-166.
- [14] Cheng Hu, Xu Wennian, Luo Ting, et al. Microbial functional diversity as affected by different engineered eco-restoration methods at Xiangjiaba Hydropower Station [J]. Journal of Environmental Engineering, 2020, 146(3): 1-13.
- [15] Luo Aidao, Yan Zongling, Zhai Wenguang. Initial Analysis on the Improvement of Highway Slope Landscape Based on the Ecological Protection [C]//4th International Conference on Sustainable Energy and Environmental Engineering, 2016.
- [16] 董康,李师翁,康文龙,等.青藏公路沿线土壤微生物数量变化及其影响因素研究[J].冰川冻土,2013,35(2):457-464.
- [17] Sharma Sharma, Szele Zaodia, Schilling Rolf, et al. Influence of freeze-thaw stress on the structure and function of microbial communities and denitrifying populations in soil [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2006,72(3):2148-2154.
- [18] 张琳瑶,刘大翔,许文年,等.冻融循环条件下生境基材中3种功能微生物数量变化规律研究[J].冰川冻土,2017,39(5):1122-1129.
- [19] 蔡晓布,张永青,邵伟.不同退化程度高寒草原土壤肥力变化特征[J].生态学报,2008,28(3):1034-1044.
- [20] 陈伟,魏虹,李昌晓,等.三峡库区不同土地利用方式土壤肥力变化:以汝溪河流域为例[J].西南师范大学学报(自然科学版),2013,38(1):96-100.
- [21] Rivera Desiree, Mejías Violeta, Jáuregui Berta, et al. Spreading topsoil encourages ecological restoration on embankments: Soil fertility, microbial activity and vegetation cover [J]. PLoS One, 2014,9(7): e101413.
- [22] Li Ruirui, Kan Shasha, Zhu Mengke, et al. Effect of different vegetation restoration types on fundamental parameters, structural characteristics and the soil quality index of artificial soil [J]. Soil and Tillage Research, 2018,184:11-23.
- [23] 水利部水利水电规划设计总院.土工试验方法标准[M].北京:中国计划出版社,2019.
- [24] Spellerberg I F, Fedor P J. A tribute to Claude Shannon (1916—2001) and a plea for more rigorous use of species richness, species diversity and the ‘Shannon-Wiener’ Index [J]. Global Ecology & Biogeography, 2003,12(3):177-179.

(上接第132页)

[参 考 文 献]

- [1] 鄂竞平,刘震,冯仁国,等.中国水土流失防治与生态安全(总卷)[M].北京:科学出版社,2010.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T20465-2006 水土保持术语[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [3] 中华人民共和国水利部. SL474-2010 河流泥沙公报编制规程[S].北京:中国水利水电出版社,2010.
- [4] Booth D B, Leverich G, Downs P W, et al. A method for spatially explicit representation of sub-watershed sediment yield, Southern California, USA [J]. Environmental Management, 2014,53(5):968-984.
- [5] 胡建军,赵力毅,风光成.黄河粗泥沙集中区输沙模数研究[J].人民黄河,2013,35(6):87-89.
- [6] 韦红波,任红玉,杨勤科.中国多年平均输沙模数的研究[J].泥沙研究,2003,28(1):39-44.
- [7] 中华人民共和国水利部.中国河流泥沙公报(2017)[R].北京:中国水利水电出版社,2018.
- [8] Polyakov V O, Nearing M A, Nichols M H, et al. Long-term runoff and sediment yields from small semi-arid watersheds in Southern Arizona [J]. Water Resources Research, 2010,46(9):204-216.
- [9] Wei Xi, Sauvage S, Ouillon S, et al. A modelling-based assessment of suspended sediment transport related to new damming in the Red River basin from 2000 to 2013 [J]. Catena, 2020,197:104958.
- [10] 中华人民共和国水利部. SL190-2007 土壤侵蚀分类分级标准[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [11] Helsel D R, Hirsch R M. Statistical Methods in Water Resources [M] // Techniques of Water Resources Investigations of the United States Geological Survey. US: Elsevier Sci. Pub. Co., 2002.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T15774-2008 水土保持综合治理效益计算方法[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [13] 唐克丽,陈永宗,景可,等.黄土高原土壤侵蚀区域特征及其治理途径[M].北京:中国科学技术出版社,1991.
- [14] 李智广.试论黄河流域水土保持高质量发展目标与途径[J].中国水利,2020(10):7-10.