

寿昌江河流泥沙来源研究

李秋艳¹, 方海燕^{2,3}, 李国强⁴

(1.中国科技出版传媒股份有限公司, 北京 100717;

2.中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

3.中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049; 4.杭州市水文水资源监测总站, 杭州 310016)

摘要:人类活动是影响河流泥沙淤积的重要因素,为探讨道路建设和河道破坏对河流产沙的影响,以浙江省寿昌江流域为研究对象,采用复合指纹识别示踪技术,得到了不同潜在泥沙来源区对河流产沙的贡献。结果表明:采用 Kruskal-Wallis H-test(KW-H)与多元判别分析(DFA)组合、主成分分析(PCA)与 DFA 组合得到的指纹示踪因子,结合复合指纹示踪模型,均能够很好地区分泥沙来源,但 PCA 和 DFA 统计法得到的 4 个指纹示踪因子组合能更好地区分泥沙来源。在河流出口处,来自河道的泥沙最多,占河流总产沙的 34.7%,其次是建设用地,其产沙贡献为总产沙的 28.1%,来自林地和水田的泥沙贡献分别为 24.1%,12.7%,旱地产沙贡献最小,仅为 0.3%。降水、土地利用、造桥、挖沙及道路建设等是引起产沙贡献差异的重要原因。因此,寿昌江流域降雨量大,植被覆盖度高,河流泥沙主要来自人类生产建设对地表的破坏。

关键词:寿昌江流域; 指纹示踪; 泥沙来源; 人类活动

中图分类号:S157; P333.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)04-0115-06

Research on Sediment Sources of the Shouchangjiang River

LI Qiuyan¹, FANG Haiyan^{2,3}, LI Guoqiang⁴

(1.China Science Publishing & Media Ltd., Beijing 100717, China; 2.Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3.College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4.Hangzhou Hydrology and Water Resources Monitoring Center, Hangzhou 310016, China)

Abstract: Human activity is the main factor inducing sediment siltation in rivers. In order to explore the impacts of road construction and river bed destruction on sediment yield in rivers, the Shoucang River in Zhejiang Province was selected in this study, and sediment contributed from different potential source areas were quantified. Two groups of fingerprinting factors were derived from the statistical combinations of Kruskal-Wallis H-test (KW-H) and discriminant function analysis (DFA), and principal component analysis (PCA) and DFA, both of which could well discriminate sediment source when they were used with a composite fingerprinting tracer model. However, the four fingerprints from PCA and DFA were better to discriminate the five potential sediment source areas. At the outlet of the river, the sediment from river beds was the most, occupying 34.7% of the total, followed by 28.1% sediment from construction lands, 24.1% sediment from forest lands, and 12.7 sediments from paddy fields. The sediment contribution from dry lands was the least, occupying only 0.3% of the total. Precipitation, land use, instream sand mining, bridge building, and road construction activities could explain the different contributions from the five potential sand source areas. Therefore, in the Shouchang River Basin where precipitation is high and vegetation coverage is dense, sediment in rivers mainly came from the destructed land surface by human production and construction activities.

Keywords: Shoucang River Basin; fingerprinting trace; sediment source; human activity

收稿日期:2021-04-22

修回日期:2021-06-13

资助项目:国家自然科学基金(41977066);国家重点研发计划(2021YFD1500703);建德市水文水资源监测站项目

第一作者:李秋艳(1978—),女,山东金乡人,博士后,策划编辑,主要从事自然地理学和出版编辑研究。E-mail:liqiuyan@mail.sciencep.com

通信作者:方海燕(1977—),男,山东金乡人,博士,研究员,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:fanghy@igsr.ac.cn

近几十年来,河流泥沙输移是学术界关注的重要科学问题之一,河流及水库等的水体污染以及泥沙淤积等都与河流泥沙的来源及在水体中的输送有着密切的联系。因此,通过对河流泥沙及附着物的研究,有助于揭示泥沙传输信息及流域泥沙的来源。因此,有必要对泥沙的来源和输移进行研究。目前,这方面的研究工作在许多国家^[1-7]都有大量开展。

河流泥沙来源研究始于20世纪初,至今已有近100 a的历史。泥沙来源研究方法主要有径流小区法、水沙资料分析法和遥感调查法等。径流小区法是最为经典的泥沙来源识别方法之一^[8],但它与遥感调查法相似,不能模拟或重现大尺度流域或区域的产沙过程,实地调查法费神费力,而水沙资料分析法的前提则是要有水文站点的观测^[9]。目前,20世纪70年代兴起的指纹识别法成为流域泥沙来源研究的热点^[10-11]。指纹法最初多采用如泥沙粒径^[12]、有机质^[13]、碳同位素^[14]及核素示踪等^[15]单一指纹因子研究泥沙来源。但单一指纹因子揭示泥沙来源具有局限性,也不能区分多个泥沙来源。相比之下,来自不同类别的指纹因子组合,除了能够提高指纹识别的可信度外,也能够区分多种泥沙来源。目前,采用复合指纹示踪技术研究泥沙来源已得到广泛应用。如Walling等^[16]采用总磷(TP), N, Sr, Ni, Zn, ²²⁶Ra, ¹³⁷Cs, Fe, Al, ²¹⁰Pb_{ex}等作为复合指纹因子研究了Ouse河及其主要支流悬浮泥沙的来源,得出了各支流对干流泥沙的贡献。Carter等^[17]利用K, Cu, As, Mn, Na, TP等作为指纹识别因子研究了Aire河流经城市后悬浮泥沙的来源及其变化。

浙江省是我国经济发达地区,人类活动十分强烈。目前,该省已有工作多集中在径流变化方面^[18],而河流产沙方面的研究很少^[19]。此外,该区经济发展迅速,道路建设和河道挖沙及建桥等严重破坏路面和河道,必将对流域产沙造成深刻影响。虽然复合指纹示踪法获取泥沙来源已得到了很好的研究成果,但沟道破坏以及道路建设等对流域产沙的影响研究仍然不多,特别是在我国的研究少见。

因此,本文以钱塘江支流寿昌江流域为研究对象,采用复合指纹示踪技术,探讨人类活动下不同泥沙来源区对流域产沙的贡献,分析其主要影响因素。该研究对流域的水土流失治理和生态环境建设,具有重要的现实与实践意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

寿昌江(118°55′—119°20′E, 29°11′—29°29′N)位于浙江省钱塘江流域的上游(图1),流域出口在更

楼水文站附近,行政区划上位于建德市境内。寿昌江更楼水文站控制流域面积为650 km²,属亚热带季风气候,梅雨季节降雨时间长,雨量集中,暴雨频繁,年降水量1 604 mm,年平均气温16.7℃。山地和丘陵占流域面积的80%以上,流域地形高差1 146 m,坡度多在30°~45°。

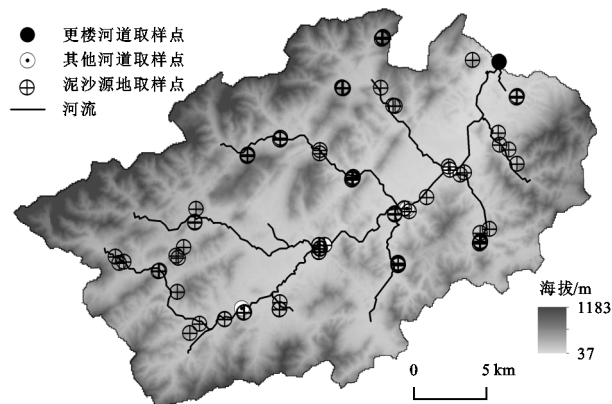


图1 研究区地形及采样点分布

土壤类型主要有红壤和水稻土,有少量黄壤、岩性土和潮土分布。强烈的构造运动,使得地形破碎。根据中国科学院资源环境科学数据中心提供的2015年土地利用数据,研究区林地、旱地、水田、建设用地的面积比例分别为79.2%, 2.8%, 15.3%, 2.6%。林地主要分布在山地丘陵上,而耕地主要分布山间平原上,多沿河两侧分布。此外,流域道路建设飞速发展,河道挖沙和建桥对河道破坏严重。

1.2 样品采集与处理

研究组于2017年12月27—29日开展了流域调查和取样工作。根据野外考察,将泥沙来源分为建设用地、河道、旱地、水田和林地5类。在泥沙源地上采样时,在同一地方不同位置处采集3—5个表层(0—10 cm)土壤样品,并混合成一个土样。在流域主河道设置了5个采样点(图1)。在河道内取样时分为两种情况,在河道挖沙或建桥造成的泥沙处,取表层土;在河道其他地方采集土样时,在河边多处采集被草丛挂住的新鲜悬移质泥沙并混合。因此,在流域内共采集了82个土壤和泥沙样品,其中河道、建设用地、旱地、水田和林地上分别有16, 12, 19, 12, 23个样品。

所有样品带回实验室晾干,并结合地类采样位置,混合得到24个样品。所有样品研磨后过筛,其中,过2 mm土壤筛的样品用于土壤粒度测试;过0.25 mm土壤筛的样品用于土壤有机碳(TOC)和总氮(TN)测试;过0.01 mm土壤筛的样品用于同位素地球化学元素测试。采用电感耦合等离子体质谱法测定地球化学元素Li, Be, P, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Cd, Sn, Cs, Ba, La,

Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, W, Tl, Pb, Th, U, SiO₂, Al₂O₃, TFe₂O₃, CaO, MgO。TOC 采用湿燃烧法测定, TN 采用元素分析仪 (Elementar Vario MAX, Germany) 测定。土壤粒度采用湿沉降法。以上测试共得到 62 个指纹因子。

1.3 复合指纹示踪法

凡是具有稳定示踪功能的物质均可作为指纹识别因子,用以示踪流域的泥沙来源,多种指纹因子的组合则称为复合指纹识别因子。复合指纹示踪泥沙来源分为 3 个步骤^[20]:

(1) 指纹因子保守性检验。选用的指纹因子在各源地中必须有显著差异,且在土壤侵蚀、泥沙输移及沉积过程中应保持稳定。保守性即是指河道内的指纹因子含量不能超过和不低于泥沙源地相应指纹因子的最大和最小含量。

(2) 复合指纹因子筛选。找到复合指纹因子,是开展复合指纹示踪泥沙来源的关键。本文采用两种统计组合方法获取。

方法一,非参数检验 (Kruskal-Wallis H-test; KW-H 检验) 与多元判别分析统计组合法。KW-H 对多个总体控制样本进行秩检验,它引入了方差分析的思想。若各样本组秩之总体变差的大部分可以由组间差来解释,则表明各样本组存在显著差异;反之,则差异不显著。因而,采用 KW-H 检验各因子是否能够识别泥沙来源:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \left(\sum_{s=1}^n \frac{R_s^2}{n_s} \right) - 3(N+1) \quad (1)$$

式中:R_s 为源地 s 秩和; n_s 为源地 s 样本数; N 为源地样本数量总和。p 表示显著性概率,当 p < 0.05 时,组间具有显著性差异。计算 KW-H 统计量 H 及其概率 p 值,并与显著性水平 α 比较判断是否接受原假设。

在 KW-H 检验的基础上,使用多元判别分析 (DFA) 法找到复合指纹因子。DFA 分析是判定哪些变量具有组间判别效力并对多个变量进行选择,最常用的 Wilks' lambda 法能够描述组间差异性。当所有观测组均值相等时, Wilks' lambda 值为 1, 当组内变异小于总变异时, Wilks' lambda 值接近于 0。

方法二,主成分分析 (PCA) 与 DFA 组合统计法。该方法首先采用 PCA 法找到与泥沙来源相关的主成分,获取较少的变量,之后再采用 DFA 法,最后得到一组复合指纹因子。

(3) 复合指纹因子示踪模型。本文将采用目前应用最为普遍的 Collins 模型^[21] 计算不同泥沙源地对产沙贡献:

$$R_{ss} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_i - \sum_{s=1}^m (P_s C_i)}{C_i} \right]^2 \quad (2)$$

$$\sum_{s=1}^m P_s = 1 \quad (0 \leq P_s \leq 1) \quad (3)$$

式中:R_{ss} 为残差平方和; n 为指纹识别因子数量; C_i 为流域出口泥沙指纹识别因子 i 的含量或比例; m 为泥沙源地数量; C_{si} 为泥沙源地 s 中指纹识别因子 i 的平均含量或比例; P_s 为泥沙源地 s 的贡献。

最后,使用拟合优度 (Goodness of Fit, GOF) 检验结果是否可以接受。GOF 计算公式如下:

$$GOF = 1 - \frac{R_{ss}}{n} \quad (4)$$

式中: n 为指纹因子数量。GOF 的值在 0~1, GOF 值越大,模型模拟的结果越好。一般来说,当 GOF > 80.0% 时,可以接受计算的结果^[22]。

2 结果与分析

2.1 保守性检验

指纹因子在土壤侵蚀、泥沙输移及沉积过程中保持稳定。因此,需要排除非保守性因子。通过识别检验,发现有 23 个因子通过了守恒性检验。它们分别是 Li, Ti, V, Cr, Ga, Sr, Nb, Cs, Ba, La, Pr, Nd, Sm, Er, Tm, Ta, W, Tl, Th, Al₂O₃, TFe₂O₃, LOI 和 TOC。以上通过守恒性检验的指纹因子才可进行下一步分析。

2.2 KW-H 与 DFA 组合得到的泥沙贡献

在保守性检验的基础上, KW-H 检验发现有 13 个指纹因子在 5 种潜在源地中组间差异显著,统计检验量 H 值范围为 14.232~18.953。进一步采用 DFA 法,得到了 6 个指纹因子,它们分别是 TOC, Ti, Sm, TFe₂O₃, Tl 和 LOI, 这些因子组合对 5 种泥沙来源的判别能力达到 100%, 单因子判别能力也都超过 47%。

根据公式(2)和以上 6 个指纹因子,得到了不同泥沙源区对河流产沙的贡献。表 1 显示,河道产沙对流域出口产沙的贡献最大,达到了 39.1%, 其次是水田和建设用地,泥沙贡献比例分别为 25.7%, 22.2%, 旱地和林地对流域出口产沙的贡献最小,仅为 8.0%, 4.9%。

表 1 河流出口更楼水文站处不同潜在泥沙来源区的贡献 %

潜在泥沙源区	KW-H 与 DFA 组合	PCA 与 DFA 组合
河道	39.1	34.7
旱地	8.0	0.3
林地	4.9	24.1
建设用地	22.2	28.1
水田	25.7	12.7

2.3 PCA 与 DFA 组合法得到的泥沙贡献

对通过守恒检查的 23 种元素进行 PCA 分析,发现有 6 个主成分特征值均超过了 1,累积方差达到了 90.51%。最大方差正交旋转法表明,除了指纹因子 Ti,Nb 和 Al_2O_3 外,其余 20 个指纹因子的载荷超均过 0.65,表明这 20 个指纹因子包含了 23 个指纹因子的大部分信息。

进一步通过 DFA 检验,得到了 4 个复合指纹因子,它们分别是 TOC,T1,La 和 Sr,此时 γ 值最小为 0。这 4 个指纹因子的综合判别能力达到 100%,其中 TOC 单因子的判别能力为 68.4%。随着复合指纹因子的增加,Wilks' lambda γ 值分别为 0.04,0.001,0.002,0。

结合复合指纹因子示踪模型,得到了不同泥沙来源区对河流产沙的贡献。发现来自河道的泥沙最多,占流域总产沙的比例为 34.7%,其次是建设地产沙,占总产沙的比例为 28.1%,来自林地和水田的泥沙贡献分别为 24.1%,12.7%,旱地的贡献最小,仅为 0.3%。

3 讨论

3.1 复合因子判别能力

本研究中,采用两种统计的组合法,分别得到了 6 个和 4 个指纹因子,这两组复合因子对 5 种潜在泥沙来源地的判别能力均较强。有研究指出^[23],较多的指纹因子个数区分泥沙来源可减少模型模拟的不确定性。PCA 与 DFA 统计法得到的 4 个指纹因子在区分泥沙来源时,GOF 值也超过了 99%。

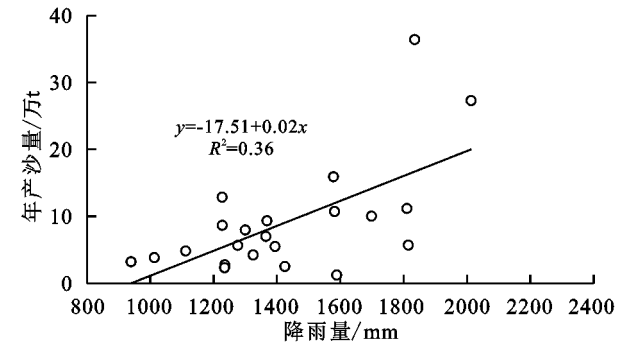
此外,使用的指纹因子较少,能减少测试费用,并能够减少判别时带来的误差。仅 TOC 和 T1 二者的总判别能力就达到了 100%的判别累积,显然优于 KW-H 和 DFA 组合法得到的因子判别能力。这一发现与已有研究一致,即较少的因子组合可提高模型模拟的精确性^[24]。因此,在研究区建议采用 PCA 与 DFA 判断泥沙来源。

3.2 影响因素分析

研究流域地形陡峭,坡度大于 10° 和 15° 的坡面分别占流域总面积的 60%和 50%以上,流域最大坡度甚至超过了 62° 。如此陡峻的地形,在降雨和人类活动影响下,极易造成水土流失^[25-27]。在研究区,年降雨量和年产沙量呈现明显的正相关关系,36%的产沙由年雨量决定的(图 2)。在 2019 年 7 月 13 日,据当地气象站报道,流域局地降雨可达 200 mm/h。如此之大的降雨,林地的破坏及其他建设用地的增加,必将对流域的产沙产生重要影响。

研究表明,修路是引起水土流失加剧的重要原

因。在英国 Severn 河 Leadon 流域,流域出口 30%的产沙来自于道路^[28]。在比利时中部 Riacho Fundo 子流域^[25],居住用地、道路和建设用地对流域产沙的贡献达到 85%,其中道路建设对流域产沙的贡献也达到 12%。在研究区,随着经济社会的发展,建设用地急剧增加,2015 年的建设用地是 20 世纪 80 年代的 3 倍还多。根据研究区的地方志记载,流域仅 2003—2006 年的康庄工程就建成通村公路 364 条。在采样前期野外考察发现,在修建或改建道路时,道路表层或周边土壤破坏严重,大量泥土裸露,使得道路建设产沙对流域产沙的贡献达到了 22%以上(表 1)。



注:数据来自《中华人民共和国水文年鉴》。

图 2 流域降雨与产沙的关系

河道活动是影响流域产沙的重要因素。在研究中,河道产沙贡献最大,这可能与强烈的河道活动有关。在流域内,无序的河道挖沙十分普遍,破坏河道,产生了大量的可侵蚀泥沙。野外考察期间发现,在河道建桥时沟道破坏严重,有大量的松散泥沙堆积在河道内(图 3),在洪水来临时极易被水流冲走。当年在河道岸边收集杂草挂住的泥沙为河道产沙,得到河道产沙贡献超过了 34%(表 1)。类似的结论在国外也有报道。例如,在英国的一个湖泊控制流域,随着流域内挖沙、开矿等人类活动对流域地表的扰动,湖泊 Bassenthwaite 的沉积量增加^[29]。近年来,寿昌江河流河水变浑浊,与当地河流中挖沙、建桥也不无关系。



图 3 研究区道路建设和造桥引起的大量易蚀物质

此外,强降雨下水田对流域产沙的贡献也要时刻注意。研究区水田主要分布在山谷中的平坦地带,尽管坡面坡度很小,水田田埂高度通常较矮。研究区水稻在耕作、插秧和收割之际,被搅浑的泥水进入河道,尽管河流含沙量不高,但可导致河水变得异常浑浊。研究区的林地面积虽然近流域的 80%,但因植被覆

盖度高,其对流域产沙的贡献并不是最大(表1)。在英国的Ext流域,林地产沙贡献甚至小于6.0%。在研究区,PCA和DFA组合法得到的林地贡献近25%,这可能与一些地方的林地破坏有关。研究区的旱地面积小,且多分布在平缓的地区,因此,旱地对流域产沙的贡献最小。

3.3 意义与展望

目前,复合指纹示踪在国内外都得到了一些应用,然而,在我国东部地区开展的工作至今未见报道。本文采用这一方法,在浙江钱塘江流域的支流寿昌江开展工作,对于这一地区的水土流失治理具有重要意义。指纹示踪的模型有很多^[30],不同的模型对计算结果多少会有偏差,但总体趋势不会差别太大。尽管模型估计得到的流域产沙贡献在研究流域还无法得到进一步验证,但以上研究结果与野外考察的发现相符。然而,本方法也存在一定的局限性,如不能够精确表明出口产沙具体来自流域哪个空间位置,也不能量化气候变化对流域出口产沙的影响,而土壤侵蚀模型的应用可解决这一问题。因此,辅以指纹示踪法,加强与土壤侵蚀模型的耦合研究^[31],对于研究区的土壤侵蚀研究和水土保持优化,具有重要的应用前景。

4 结论

(1) 两种统计方法组合所得到的指纹因子结合均能够区分泥沙来源,但PCA和DFA统计组合得到的4个指纹因子更能很好地区分泥沙来源。

(2) 在河道出口处来自河道的泥沙最多,占比达到34.7%,其次是建设用地,占比为28.1%,来自林地和水田的贡献分别为24.1%,12.7%,旱地贡献最小,仅为0.3%。

(3) 降水、地形、土地利用和其他人类活动是造成以上产沙贡献差异的原因。研究区的自然条件,加之河道破坏和道路建设,使得大量细小颗粒进入水中,致使河水变得浑浊。今后应加强河道监管,在道路建设时应加强保护,避免水土流失。

参考文献:

- [1] Rovira A, Batalla J R. Temporal distribution of suspended sediment transport in a Mediterranean basin: The Lower Tordera(NESPAIN)[J]. *Geomorphology*, 2006, 79(1/2):58-71.
- [2] Lenzi M A, Marchi L. Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites (northern Italy)[J]. *Catena*, 2000,39(4):267-282.
- [3] Asselman N E M. Suspended sediment dynamics in a large drainage basin: The River Rhine [J]. *Hydrological Processes*, 1999,13(10):1437-1450.
- [4] Williams G P. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers [J]. *Journal of Hydrology*, 1989,111(1/4):89-106.
- [5] Gomez B, Phillips J D, Magilligan F J, et al. Floodplain sedimentation and sensitivity: summer 1993 flood, upper Mississippi River valley [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1997,22(10):923-936.
- [6] Fang H Y, Cai Q G, Chen H, et al. Temporal changes in suspended sediment transport in a gullied loess basin: The lower Chabagou Creek on the Loess Plateau in China [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2008,33(13):1977-1992.
- [7] 盛美玲,方海燕,孙亚茹.东北黑土区小流域侵蚀产沙影响因素分析[J].*陕西师范大学学报:自然科学版*,2015,43(1):86-92.
- [8] 姚文艺,王卫东.黄河泥沙来源研究评述[J].*人民黄河*, 1998,20(6):14-17.
- [9] 李万寿.黄河源头地区泥沙来源的初步分析[J].*泥沙研究*,2005(1):67-72.
- [10] Collins A L, Zhang Y, Walling D, et al. Quantifying fine-grained sediment sources in the River Axe catchment, southwest England: Application of a Monte Carlo numerical modelling framework incorporating local and genetic algorithm optimization [J]. *Hydrological Processes*, 2012,26(13):1962-1983.
- [11] Haddadchi A, Ryder D S, Evrard O, et al. Sediment fingerprinting in fluvial systems: Review of tracers, sediment sources and mixing models [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2013,28(4):560-578.
- [12] 徐建华,林银平,吴成基,等.黄河中游粗泥沙集中来源区界定研究[M].郑州:黄河水利出版社,2006.
- [13] 张风宝,薛凯,杨明义,等.坝地沉积旋回泥沙养分变化及其对小流域泥沙来源的解释[J].*农业工程学报*, 2012,28(20):143-149.
- [14] 高进长,朱虹,龙翼,等.川中丘陵区小流域土地利用变化和泥沙来源示踪的 $\delta^{13}\text{C}$ 技术[J].*山地学报*,2015,33(5):521-527.
- [15] 张信宝,李少龙,王成华,等.黄土高原小流域泥砂来源的 ^{137}Cs 法研究[J].*科学通报*,1989,34(3):210-213.
- [16] Walling D E, Ovens P N, Leeks G J L. Fingerprinting suspended sediment sources in the catchment of the River Ouse, Yorkshire, UK [J]. *Hydrological Processes*, 1999,13(7):955-975.
- [17] Carter J, Owens P N, Walling D E, et al. Fingerprinting suspended sediment sources in a large urban river system [J]. *Science of the Total Environment*, 2003,314/316:513-534.
- [18] 夏芳.钱塘江流域气候变化及其对水文径流的影响[D].杭州:浙江大学,2016.

- [19] 桑广书,袁扬,黄秋亚.浙江省兰溪市地下长河河水泥沙来源与治理对策[J].浙江水利科技,2016(2):58-61.
- [20] Minella J P G, Walling D E, Merten G H. Combining sediment source tracing techniques with traditional monitoring to assess the impact of improved land management on catchment sediment yields [J]. Journal of Hydrology, 2008,348(3/4):546-563.
- [21] Collins A L, Walling D E, Leeks G J L. Source type ascription for fluvial suspended sediment based on a quantitative composite fingerprinting technique [J]. Catena, 1997,29(1):1-27.
- [22] Motha J A, Wallbrink P J, Hairsine P B, et al. Determining the sources of suspended sediment in a rested catchment in southeastern Australia [J]. Water Resources Research, 2003, 39 (3). DOI: 10.1029/2001WR000794, 2003.
- [23] Sherriff S C, Rowan J S, Melland A R, et al. Investigating suspended sediment dynamics in contrasting agricultural catchments using ex situturbidity: Based suspended sediment monitoring [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015,19(8):3349-3363.
- [24] Nosrati K, Collins A L, Madankan M. Fingerprinting sub-basin spatial sediment sources using different multivariate statistical techniques and the Modified MixSIR model [J]. Catena, 2018,164:32-43.
- [25] Franz C, Makeschin F, Weib H, et al. Sediments in urban river basins: Identification of sediment sources within the Lago Paranoá catchment, Brasília DF, Brazil-using the fingerprint approach [J]. Science of the Total Environment, 2014,466/467:513-523.
- [26] 方海燕,孙莉英,聂斌斌,等.基于 WaTEM/SEDEM 模型的双枫潭流域侵蚀产沙模拟[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2014,42(1):92-97.
- [27] 孙莉英,郑明国,蔡强国,等.张家界地区溇水流域洪水特征分析[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2014,42(2):95-102.
- [28] Gruszowski K E, Foster I D L, Lees J A, et al. Sediment sources and transport pathways in a rural catchment, Herefordshire, UK [J]. Hydrological Processes, 2003,17(13):2665-2681.
- [29] Florsheim J L, Pellerin B A, Oh N H, et al. From deposition to erosion: Spatial and temporal variability of sediment sources, storage, and transport in a small agricultural watershed [J]. Geomorphology, 2011,132(3):272-286.
- [30] 郭进,文安邦,严冬春,等.复合指纹识别技术定量追踪流域泥沙来源[J].农业工程学报,2014,30(2):94-104.
- [31] 李国强,方海燕.基于¹³⁷Cs 示踪和 WaTEM/SEDEM 模型的黑土区小流域侵蚀产沙模拟[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2015,43(3):86-92.

(上接第 114 页)

- [21] 蒋平海,周正朝,李静,等.黄土区不同植被类型条件下土壤分离速率变化特征及其影响因素[J].水土保持研究,2018,25(2):105-111.
- [22] 湛芸,何丙辉,练彩霞,等.紫色土区 3 种草本植物根系特征及改土培肥效应[J].草业学报,2015,24(10):99-107.
- [23] 王云琦,王玉杰,张洪江,等.重庆缙云山不同土地利用类型土壤结构对土壤抗剪性能的影响[J].农业工程学报,2006,22(3):40-45.
- [24] 张晓明,王玉杰,夏一平,等.重庆缙云山典型植被原状土与重塑土抗剪强度研究[J].农业工程学报,2006,22(11):6-9.
- [25] 邢鲜丽,李同录,李萍,等.黄土抗剪强度与含水率的变化规律[J].水文地质工程地质,2014,41(3):53-59,97.
- [26] 李晓丽,于际伟,刘李杰,等.鄂尔多斯坳砂岩力学特性的试验研究[J].干旱区资源与环境,2016,30(5):118-123.
- [27] 黄琨,万军伟,陈刚,等.非饱和土的抗剪强度与含水率关系的试验研究[J].岩土力学,2012,33(9):2600-2604.
- [28] 高岩,党晓宏,蒙仲举,等.采煤沉陷区植物根系损伤及修复研究进展[J].内蒙古林业科技,2020,46(4):50-55.
- [29] 蒙仲举,任晓萌,陈晓燕,等.采煤塌陷对沙柳根系损伤机理研究[J].北方园艺,2014,38(1):66-68.
- [30] 王文龙,李占斌,张平仓.神府东胜煤田开发中诱发的环境灾害问题研究[J].生态学杂志,2004,23(1):34-38.
- [31] 范立民.榆神府区煤炭开采强度与地质灾害研究[J].中国煤炭,2014,40(5):52-55.
- [32] 张延旭,毕银丽,陈书琳,等.半干旱风沙区采煤后裂缝发育对土壤水分的影响[J].环境科学与技术,2015,38(3):11-14.
- [33] 杜国强,陈秀琴,郅晨龙,等.半干旱矿区地裂缝对土壤水分和地表剪切强度的影响[J].生态与农村环境学报,2016,32(2):224-228.
- [34] 台晓丽,胡振琪,陈超.风沙区采煤沉陷裂缝对表层土壤含水量的影响[J].中国煤炭,2016,42(8):113-117.