

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第6期

Vol.36 No.6

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊春季气溶胶吸湿性分析	徐彬, 张泽锋, 李艳伟, 秦鑫, 缪青, 沈艳 (1911)
南京北郊秋冬季相对湿度及气溶胶理化特性对大气能见度的影响	于兴娜, 马佳, 朱彬, 王红磊, 严殊祺, 夏航 (1919)
南京北郊冬季霾天 PM _{2.5} 水溶性离子的污染特征与消光作用研究	周瑶瑶, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 王荔 (1926)
京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系	李梦, 唐贵谦, 黄俊, 刘子锐, 安俊琳, 王跃思 (1935)
长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征	莫梓伟, 牛贺, 陆思华, 邵敏, 勾斌 (1944)
贵阳酸雨中溶解态重金属质量浓度及形态分析	朱兆洲, 李军, 王志如 (1952)
北京市火葬场大气污染物排放现状及污染特征	薛亦峰, 闫静, 田贺忠, 熊程程, 李敬东, 吴晓清, 王玮, 朱家昕 (1959)
北京市燃煤锅炉烟气中水溶性离子排放特征	胡月琪, 马召辉, 冯亚君, 王琛, 陈圆圆, 何明 (1966)
燃煤电厂湿烟卤降雨成因分析	欧阳丽华, 庄焯, 刘科伟, 陈振宇, 顾鹏 (1975)
Mn-Ce/分子筛的脱汞特性研究	谭增强, 牛国平, 陈晓文, 安振 (1983)
办公室内颗粒物载带溴系阻燃剂的人体呼吸暴露	李岫雯, 曹辉, 倪宏刚 (1989)
森林生物质燃烧烟尘中的有机碳和元素碳	黄柯, 刘刚, 周丽敏, 李久海, 徐慧, 吴丹, 洪蕾, 陈惠雨, 杨伟宗 (1998)
北京市常见落叶树种叶片滞纳空气颗粒物功能	王兵, 王晓燕, 牛香, 张维康, 汪金松 (2005)
气相中乙酸乙酯光解的光子效率: 波长和催化剂的影响	方雪慧, 赵洁, 舒莉, 高永, 叶招莲 (2010)
长江口邻近海域赤潮水体浮游植物光吸收特性分析	刘洋洋, 沈芳, 李秀珍 (2019)
深圳近岸海域全氟化合物的污染特征	刘宝林, 张鸿, 谢刘伟, 刘国卿, 王艳萍, 王鑫璇, 李静, 董炜华 (2028)
杭州西湖“香灰土”沉积物轻、重有机质组成特征及其环境意义	李静, 朱广伟, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军 (2038)
小清河表层沉积物重污染区重金属赋存形态及风险评价	黄莹, 李永霞, 高甫威, 徐民民, 孙博, 王宁, 杨健 (2046)
调水型水库藻类对调水氮、磷浓度与水量的响应	万由鹏, 尹魁浩, 彭盛华 (2054)
三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系	张磊, 蔚建军, 付莉, 周川, Douglas G. Haffner (2061)
藻华聚集的环境效应: 对漂浮植物水葫芦光合作用的影响	包先明, 顾东祥, 吴婷婷, 石祖良, 刘国峰, 韩士群, 周庆 (2070)
巢湖沉积物有效磷的原位高分辨分析研究	李超, 王丹, 杨金燕, 王燕, 丁士明 (2077)
贵州施秉白云岩喀斯特区水化学和溶解无机碳稳定同位素特征	肖时珍, 蓝家程, 袁道先, 王云, 杨龙, 敖向红 (2085)
长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义	李广, 章新平, 张立峰, 王跃峰, 邓晓军, 杨柳, 雷超桂 (2094)
元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征	张小娟, 宋维峰, 吴锦奎, 王卓娟 (2102)
植草沟控制道路径流污染效果的现场实验研究	黄俊杰, 沈庆然, 李田 (2109)
Fe/Cu 催化还原降解饮用水中溴氯乙腈的性能研究	丁春生, 马海龙, 傅洋平, 赵世督, 李东兵 (2116)
三维花状结构 α -FeOOH 协同 H ₂ O ₂ 可见光催化降解双氯芬酸钠	许俊鸽, 李云琴, 黄华山, 苑宝玲, 崔浩杰, 付明来 (2122)
UV/H ₂ O ₂ 降解羟苯甲酮反应动力学及影响因素	冯欣欣, 杜尔登, 郭迎庆, 李华杰, 刘翔, 周方 (2129)
钼掺杂 TiO ₂ 光催化降解全氟辛酸	刘晴, 喻泽斌, 张睿涵, 李明洁, 陈颖, 王莉, 匡瑜, 张搏, 朱有慧 (2138)
低频无极灯降解偶氮染料酸性橙 7	吴朋, 吴军, 高士祥, 孙成, 蒋正方 (2147)
纳米 Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ 非均相类 Fenton 体系对 3,4-二氯三氟甲苯的降解	孙正男, 杨琦, 纪冬丽, 郑琳 (2154)
流变相法制备包覆型 CMC-Fe ⁰ 及降解水中 TCE 的研究	樊文井, 成岳, 余淑贞, 范小丰 (2161)
Pd-Fe/石墨烯多功能催化阴极降解 4-氯酚机制研究	祁文智, 王凡, 王辉, 施钦, 逢磊, 卞兆勇 (2168)
锰氧化物改性硅藻土对苯胺的去除动力学与机制	肖少丹, 刘露, 姜理英, 陈建孟 (2175)
铅-十六烷基三甲基氯化铵改性活性炭对水中硝酸盐和磷酸盐的吸附特性	郑雯婧, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (2185)
聚(丙烯酸酰胺-二乙烯基苯)对水溶液中刚果红的吸附	张变变, 廖运文, 高和军, 王忠志, 帅超 (2195)
大型再生水厂不同污水处理工艺的能耗比较与节能途径	杨敏, 李亚明, 魏源送, 吕鑑, 郁达伟, 刘吉宝, 樊耀波 (2203)
污泥水热液化水相产物中氮元素变化规律的研究	孙衍卿, 孙震, 张景来 (2210)
不同接种污泥 ABR 厌氧氨氧化的启动特征	张海芹, 王翻翻, 李月寒, 陈重军, 沈耀良 (2216)
基于微波-过氧化氢-碱预处理的污泥水解影响因素	贾瑞来, 魏源送, 刘吉宝 (2222)
蠡河底泥中反硝化复合菌群富集及菌群结构研究	雍佳君, 成小英 (2232)
不同类型及不同浓度抗生素条件下活性污泥丝状菌种群多样性分析	王润芳, 王琴, 张红, 齐嵘 (2239)
石油降解菌的分离鉴定及 4 株芽胞杆菌种间效应	王佳楠, 石妍云, 郑力燕, 王喆, 蔡章, 刘杰 (2245)
Sheewanella oneidensis MR-1 对针铁矿的还原与汞的生物甲基化	司友斌, 孙林, 王卉 (2252)
根表铁氧化物胶膜对水稻吸收诺氟沙星的影响	马微, 鲍艳宇 (2259)
不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响	禄兴丽, 廖允成 (2266)
城市区域近地表灰尘及重金属沉降垂向季节变化	李晓燕, 张舒婷 (2274)
中山市农业区域土壤-农产品中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 污染特征	李彬, 吴山, 梁金明, 梁文立, 陈桂贤, 李拥军, 杨国义 (2283)
经口摄入土壤多溴联苯醚生物可给性变化及影响因素的体外消化模拟	张云惠, 刘伟健, 程芳芳, 熊冠男, 杨笑寒, 王歆, 陶澍, 邢宝山, 刘文新 (2292)
生物炭输入对土壤本底有机碳矿化的影响	陈威, 胡学玉, 陆海楠 (2300)
改良剂对广西环江强酸铅锌污染土壤的修复作用	曾伟铨, 宋波, 袁立竹, 黄宇妃, 伏凤艳 (2306)
蒙脱石-OR-SH 复合体材料对土壤镉的钝化及机制	曾燕君, 周志军, 赵秋香 (2314)
焦岗湖湿地土地利用格局演变及区域可持续性评价	杨阳, 蔡怡敏, 白艳莹, 陈卫平, 杨秀超 (2320)
《环境科学》征订启事 (1965) 《环境科学》征稿简则 (2115) 信息 (1925, 2076, 2084, 2146)	

元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征

张小娟¹, 宋维峰^{1*}, 吴锦奎², 王卓娟¹

(1. 西南林业大学环境科学与工程学院, 昆明 650224; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

摘要: 稳定同位素技术为土壤水的运移研究提供了一种全新的研究手段。通过对元阳梯田水源区降水及其4种典型植被类型(乔木林、灌木林、荒草地和无林地)下0~100 cm剖面土壤水进行采样和氢氧稳定同位素的分析测定, 研究了该区不同深度层次上土壤水的稳定同位素特征。结果表明, 元阳梯田水源区的大气降水线方程为 $\delta D = 6.8384\delta^{18}O - 5.6921$ ($R^2 = 0.8787$, $n = 20$), 其斜率和截距均小于全球大气降水线。4种典型植被类型下的土壤水氢氧稳定同位素值均落于当地大气降水线下方, 且其表层土壤剖面上的同位素值波动变化幅度较大。随着土层深度的增加, $\delta^{18}O$ 值的波动变化越来越小, 尤其以80~100 cm土层体现的最为明显。乔木林和荒草地两种林分类型整体上深层土壤水中的 $\delta^{18}O$ 值要偏高于表层土壤, 而灌木林和无林地则恰恰相反。

关键词: 元阳梯田; 土壤水; 蒸发; 森林; 氢氧同位素

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)06-2102-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.06.025

Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes of Soil Water in the Water Source Area of Yuanyang Terrace

ZHANG Xiao-juan¹, SONG Wei-feng^{1*}, WU Jin-kui², WANG Zhuo-juan¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Stable isotope techniques provide a new approach to study soil water movement. The precipitation and the soil water from 0 to 100 cm soil layer in 4 kinds of typical vegetation types (forest, shrub forest, grassland and non-forest land) over the water source area of Yuanyang terrace were sampled, and their isotope compositions were analyzed, aimed to understand the characteristics of stable isotopes in different depth of the soil water. The results showed that the meteoric water line in the water source area of Yuanyang terrace was $\delta D = 6.8384\delta^{18}O - 5.6921$ ($R^2 = 0.8787$, $n = 20$), the slope and intercept were less than the global atmospheric precipitation. The hydrogen and oxygen stable isotopes in the soil water of the 4 kinds of typical types was lower than the local meteoric water line side and the fluctuation of isotope value on surface soil profile was greater. With the increasing soil depth, the fluctuation of $\delta^{18}O$ value was smaller and smaller, especially in the 80-100 cm soil layer which was the most obvious. The $\delta^{18}O$ values of the deep soil water in forest and grassland were higher than that in the surface soil, while it was on the contrary in shrub forest and non-forest land.

Key words: Yuanyang terrace; soil water; evaporation; forest; hydrogen and oxygen isotopes

土壤水是地面以下至地下水水位以上土壤层中的水分, 亦称作非饱和带水^[1]。土壤水是联系地表水、地下水和生物地球循环的纽带, 维持着全球初级生产力形成的能量平衡和物质传输^[2]。土壤水分运移等方面的研究对于地下水补给变化、实现土壤水和地下水资源的合理利用具有重要的理论和现实意义。

土壤水分运移是一种十分复杂的物理化学作用过程, 其研究一直是水循环研究的热点和难点。许多研究者先后提出了多种理论方法, 但由于其自身的复杂性, 这些方法都存在不同程度的不足之处^[1~3]。近年来发展起来的氢氧稳定同位素示踪技术利用了自然水体中氢氧同位素组成来标记水循环过程, 相对于其它方法而言, 具有较高的灵敏度和准确性^[4]。水体中稳定同位素的变化可用来获取重

要的水文过程信息如入渗、蒸发、蒸散和渗透等, 从而为进一步研究土壤水分的动态变化、运移特征及分析其补给机制等提供了重要依据^[3, 5]。

Lee等^[6]和Mueller等^[7]运用稳定同位素技术探明了非饱和层土壤水分的运移特征和斜坡地带土壤水分的运移路径。与国外相比, 国内的研究起步较晚。田立德等^[5]通过测定表层土壤水中的 $\delta^{18}O$ 研究了土壤蒸发对土壤表层水中 $\delta^{18}O$ 的影响; 一些专家学者^[8~10], 对部分地区的大气降水和露水中的氢氧稳定同位素特征进行了相关研究; 也有许多专家学者^[11~14]利用氢氧稳定同位素技术对不同地区的

收稿日期: 2014-12-14; 修订日期: 2015-01-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371066)

作者简介: 张小娟(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为森林水文和土壤水, E-mail: xjzhang1991@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: songwf85@126.com

土壤水垂直运移、降雨入渗过程中土壤水稳定同位素特征及其变化规律等进行了研究,但元阳梯田区土壤水分运移机制的研究还尚未见报道. 元阳梯田构建了“森林-村寨-梯田-江河”四素共构的农业生态系统^[15],近 3 年来,云南全省遭受了百年不遇的大旱,哈尼梯田却依然波光粼粼,水源充足. 因此,研究元阳梯田水源区的土壤水运移特征具有重要的意义.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

元阳县位于云南省南部,哀牢山脉南段,其核心区梯田在元阳县境内面积约有 $1.32 \times 10^4 \text{ hm}^2$,分布于海拔 700 ~ 1 800 m 之间,距今已有 1 300 a 的历史,是中国众多古代梯田的典型代表之一^[16],具有独特的垂直特征(图 1). 研究区位于梯田核心区上方水源林区,主要分布在全福庄小寨大渔塘、多沙和勐品林区($102^\circ44'9.4'' \sim 102^\circ46'11.1''\text{E}$, $23^\circ4'31.3'' \sim$

$23^\circ6'17.3''\text{N}$). 研究区属中低山丘陵地貌,海拔 1 584 ~ 1 955 m. 气候属亚热带山地季风气候,年平均气温为 20.5°C ,年最高气温 37.5°C ,年最低气温 0.6°C ;年降水量为 1 500 ~ 2 000 mm;年均日照时数 1 820.8 h. 土壤多为黄棕壤、黄壤,土壤剖面完整,土层厚度约 100 cm^[17]. 该区天然林森林茂密,植物种类繁多. 样地基本情况见表 1.

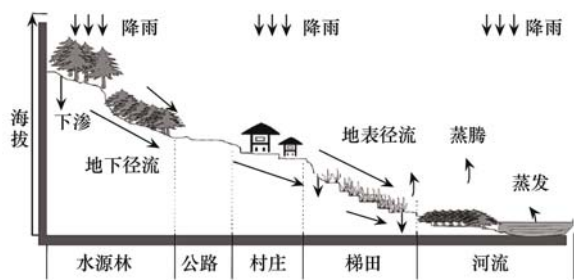


图 1 元阳梯田空间结构
Fig. 1 Space structure of Yuanyang terrace

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic information of the sampling plots

立地类型	样方布设	海拔/m	坡向	优势植被	地理坐标	
					东经(E)	北纬(N)
乔木林地	样方 1	2 020. 5	东	西南山茶	102°46'11"	23°05'37"
	样方 2	2 020. 9		印度木荷	102°46'11"	23°05'37"
	样方 3	2 022. 8		泡花树	102°46'10"	23°05'37"
灌木林地	样方 1	1 966. 8	东	山柑	102°46'18"	23°05'45"
	样方 2	1 968. 1		羊脆骨	102°46'18"	23°05'44"
	样方 3	1 976. 5		毛刺花椒	102°46'17"	23°05'44"
荒草地	样方 1	1 921. 5	东	蕨菜、爵床、铁线莲、	102°46'16"	23°05'51"
	样方 2	1 923. 8		叶下珠、芨草等	102°46'16"	23°07'27"
	样方 3	1 924. 2			102°46'16"	23°05'57"
无林地	样方 1	1 968. 9	东	—	102°46'16"	23°05'45"

1.2 研究方法

1.2.1 研究区域选择及标准样地布设

研究区位于云南省元阳县麻栗寨河流域,于 2014 年 7 ~ 8 月在该流域上游的全福庄小流域出口处,依托所建卡口站,进行小流域内径流水分氢氧同位素样品采集. 并在该流域内建立 3 个标准样地,用于采集土壤剖面不同深度上土壤样品.

1.2.2 氢氧同位素测定水样的收集和室内分析

大气降水:采样点选取露天空旷位置,放置一个聚乙烯瓶,瓶口处加装漏斗,漏斗口放置一乒乓球防止水分蒸发,每次降水完毕立即采集. 采集的水样转入离心管中,并立即用 Parafilm 膜封口,于塑料瓶身标注采样地点、时间,保存在低温保温箱中带回

实验室,放置于冰箱冷藏保存以待同位素测定.

土壤水:在研究区 3 类典型植被类型(乔木林、灌木林、荒草地)中各选一个典型样地,设置 1 个无林对照样地,在每一类典型样地内随机选取 3 个样方(无林对照样地内随机选取 1 个样方),采用土钻法,在 10 个样方中采集垂直土壤剖面不同深度(0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80、80 ~ 100 cm)的土壤样品. 土壤样品装入离心管后立即用 Parafilm 膜封口,保存在低温保温箱中带回实验室采用真空蒸馏法^[18]提取土壤水. 将提取出的土壤水装入 5 mL 的冷冻管中,并立即用 Parafilm 膜封口放入冰箱冷藏,待同位素测定时将冷冻管中的土壤水样品移入 2 mL 的棕色同位素进样瓶中进行上机测定.

地表水:在3个有林地内收集溪水样品,在河流出口处收集河水样品.样品装入离心管后立即用Parafilm膜封口,保存在低温保温箱中带回实验室测定.

地下水:在研究区域内泉水出露点收集样品.样品装入离心管后立即用Parafilm膜封口,保存在低温保温箱中带回实验室测定.

研究区0~100 cm土层土壤蓄水量最大可达249.27 mm^[19];研究表明^[20],真空蒸馏比共沸蒸馏更适合土壤和植物水分的提取,且真空蒸馏法提取出的水分更能真实地反映样品中氢氧同位素的组成.故土壤水的提取采用真空蒸馏法来完成,实验温控为90~100℃,土壤水提取百分比接近98%.所有水样 δD 和 $\delta^{18}O$ 测定在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所同位素实验室使用液态同位素激光分析仪LGR LWIA完成.测得的样品中的 δD 和 $\delta^{18}O$ 用同位素比率^[21]来表示.表达式为:

$$\delta(\text{‰}) = \left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000$$

式中, R_{sample} 为样品的同位素比值, R_{standard} 为标准物质的同位素比值. δD 的精度为 $\pm 1\text{‰}$; $\delta^{18}O$ 的精度为 $\pm 0.2\text{‰}$.

2 结果与讨论

2.1 大气降水氢氧稳定同位素特征

大气降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 之间的关系对于研究同位素水文学具有重要的意义^[22],二者之间的关系在一定程度上可以反映出研究区地理和气候情况,可以直观地反映研究地区大气降水过程中蒸发、凝结的不平衡程度,确定一个地区基于氢氧稳定同位素的大气降水特征是研究区域内水资源的一项重要先决条件^[23].

根据研究区2014年7~8月间收集的20个大气降水样,回归拟合出研究区的大气降水线方程(图2)为:

$$\delta D = 6.8384 \delta^{18}O - 5.6921$$

$$(R^2 = 0.8787, n = 20)$$

元阳梯田区大气降水中 δD 值介于 -47‰ ~ -97‰ 之间,均值 -70‰ ; $\delta^{18}O$ 介于 -6.5‰ ~ -13.2‰ 之间,均值 -9.4‰ .

与全球降水线方程 $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$ ^[24]和我国降水线方程 $\delta D = 7.74 \delta^{18}O + 6.48$ ^[25]相比,该降水线方程的斜率与截距均偏小,说明大气降水下渗到地下后,其同位素值变化趋于均一化,反映了其在时

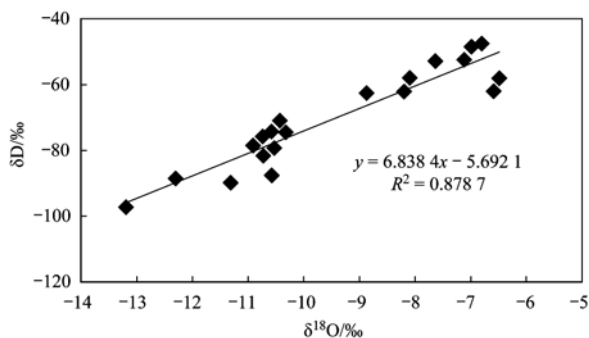


图2 元阳梯田区大气降水氢氧稳定同位素特征分布

Fig. 2 Characteristic distribution of hydrogen and oxygen stable isotopes in rainwater samples of Yuanyang terrace

间空间上的混合^[26];但其与地理位置相近的昆明大气降水线方程 $\delta D = 6.39 \delta^{18}O - 5.38$ ($R^2 = 0.88$)^[27]比较接近,这可能与研究区和昆明所处的大气环流背景、水汽来源等有关.两者均属于我国西南边界的云南省,降水均为来自西南通道和南海通道的水汽所形成.西南通道和南海通道上的水汽在向大陆迁移过程中,由于不断形成降水,降水云团中所剩水汽的份额不断减少,重同位素产生一定的损耗^[28],即稳定同位素在降水过程中经历了相当程度的贫化.

本次研究取样虽然仅利用了2014年7~8月间的20场降雨数据,但与邻近地区的研究结果相近,因此研究结果大体上可以反映研究区大气降水的氢氧稳定同位素特征.

2.2 土壤水氢氧稳定同位素特征

2.2.1 总体特征

对4种不同林分类型下土壤水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 进行回归拟合(图3),方程式分别如下:

$$\text{乔木林地: } \delta D = 7.8037 \delta^{18}O + 8.6569$$

$$R^2 = 0.9967, n = 36$$

$$\text{灌木林地: } \delta D = 7.721 \delta^{18}O + 5.5174$$

$$R^2 = 0.9917, n = 36$$

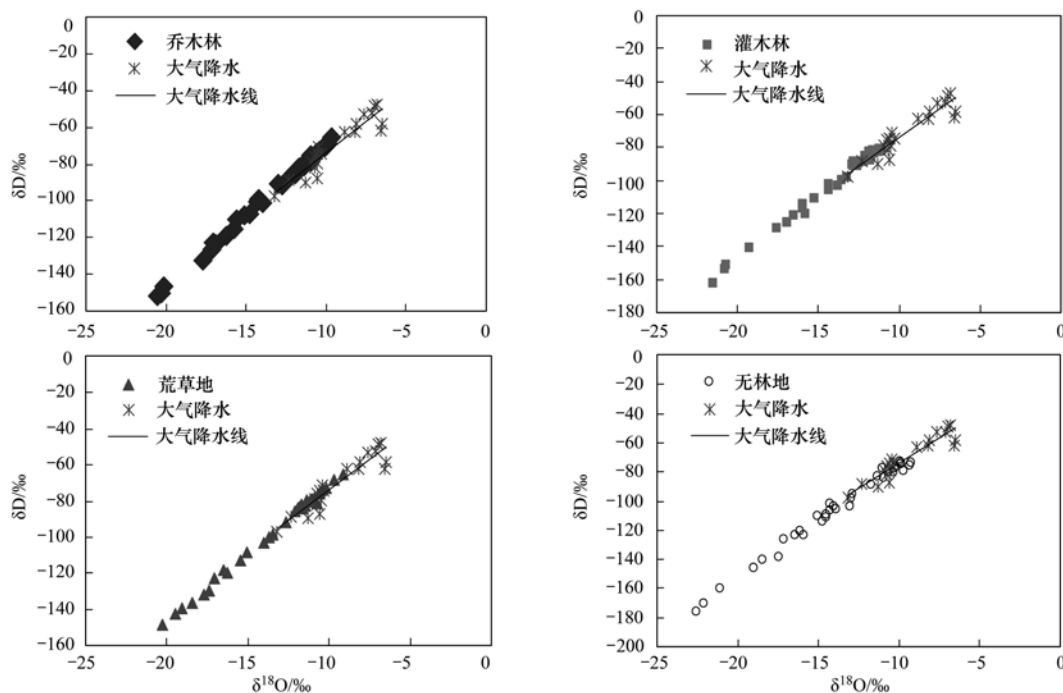
$$\text{荒草地: } \delta D = 7.6285 \delta^{18}O + 5.5823$$

$$R^2 = 0.9962, n = 36$$

$$\text{无林地: } \delta D = 7.725 \delta^{18}O + 0.9444$$

$$R^2 = 0.9889, n = 35$$

将此4种林分类型下共计143个样品的氢氧稳定同位素值进行综合分析,获得研究区土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 的关系为: $\delta D = 7.7535 \delta^{18}O + 5.5889$ ($R^2 = 0.9829, n = 143$); δD 的变化范围为: -177‰ ~ -65‰ ,平均值为 -100‰ , $\delta^{18}O$ 的变化范围为: -22.5‰ ~ -9.7‰ ,平均值为 -13.7‰ .

图3 不同林分类型下土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 关系曲线Fig. 3 Relationship curves of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in soil water under different forest types

土壤水中的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的数学平均值为 -100‰ 和 -13.7‰ ,明显低于大气降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值 -70‰ 和 -9.4‰ 。表明在研阶段,研究区土壤水并不单纯来自降水,更多的是原有土壤水与当季降水的混合,且土壤水与降水氢、氧同位素相比明显偏负,说明土壤水更多是来自前期降水。

研究区各个林分类型大部分土壤水同位素值落于当地大气降水线之下,且该区大气降水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值分别为 -70‰ 和 -9.4‰ ,明显高于土壤水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值。造成此现象的原因可能有以下几方面:土壤水是一种混合水,它可能来源于不同的时间和空间,而采集到的大气降水主要是高温期的;北半球降水的同位素效应非常明显,虽然在我国南方也存在降水量效应,但温度效应更加显著^[23],因此,高温期的样品同位素值相对较高。所采土壤水是多时期大气降水入渗和蒸发的结果,因此土壤水可能来自冷期降水;且大气降水还存在海拔效应等;本区海拔从约100 m到将近3 000 m,也是导致采样期内降水与土壤水同位素组成差异较大的因素之一,土壤水特别是深层土壤水还可能来源于高海拔处。除此之外,还存在一种可能,即取样过程中的问题。由于采样期内研究区气温较高,蒸发较大,对降水样品的同位素值也可能产生了一定的影响。

2.2.2 不同深度土壤水同位素随时间的变化

图4为不同深度土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值的时间变化特征,通过观察可以发现,4种不同林分类型下表层土壤剖面上的 $\delta^{18}\text{O}$ 值波动变化幅度较大,一定程度上体现了土壤蒸发等同位素分馏效应。随着土层深度的增加, $\delta^{18}\text{O}$ 值的波动变化越来越小,尤其以80~100 cm土层表现最为明显,其 $\delta^{18}\text{O}$ 值基本趋于稳定。

在0~10、10~20、20~40 cm这3个土壤层次上,2014年7月4日、7月8日、7月9日这4种不同林分类型下的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值趋于稳定,均介于 -13.9‰ 和 -9.2‰ 之间,且乔木林、灌木林和荒草地3种植被类型下的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值基本持平,而无林地的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值要略大于这3种植被类型下的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值。这种差异可能是由于乔木林、灌木林和荒草地这3种林分类型的植被覆盖度较大,温度较低,且人为干扰较小,导致蒸发减弱,同位素分馏效应不明显所致。

2014年8月4日,4种不同林分类型在0~10、10~20、20~40 cm这3个土壤层次上的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值急剧减小且小于7月土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值,成为整个采样期内的最低值,这是由于大气降水同位素的降水量效应所产生。根据所建卡口站雨量观测数据可知,从2014年7月10日至2014年8月4日,研究区日降水量累计可达304 mm,成为此期间降水量的

最大值. Dansgaard^[29] 经观测发现 $\delta^{18}\text{O}$ 值和降水量存在显著的负相关关系,降水量越大, $\delta^{18}\text{O}$ 值越小. 在此期间,研究区保持着连续的不同强度的降水事件,累计降水量较大, $\delta^{18}\text{O}$ 值随着降水量的逐渐增大不断减小,直至8月4日达到了最低值,大气降水同位素的降水量效应明显. 由于此后降水量的逐渐减少和气温的日趋回升,8月11日和8月18日的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值均大于8月4日,但仍小于7月土壤水 $\delta^{18}\text{O}$

值. 说明研究区8月的降水总量较大,温度较高,蒸发分馏作用明显且仍受前期降水量效应的持续影响.

对于40~60、60~80、80~100 cm这3个土壤层,在整个采样期内,4种不同林分类型下的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化波动均较小,基本趋于稳定,这在一定程度上说明,大气降水对于较深层次的土壤水的补给特别微弱.

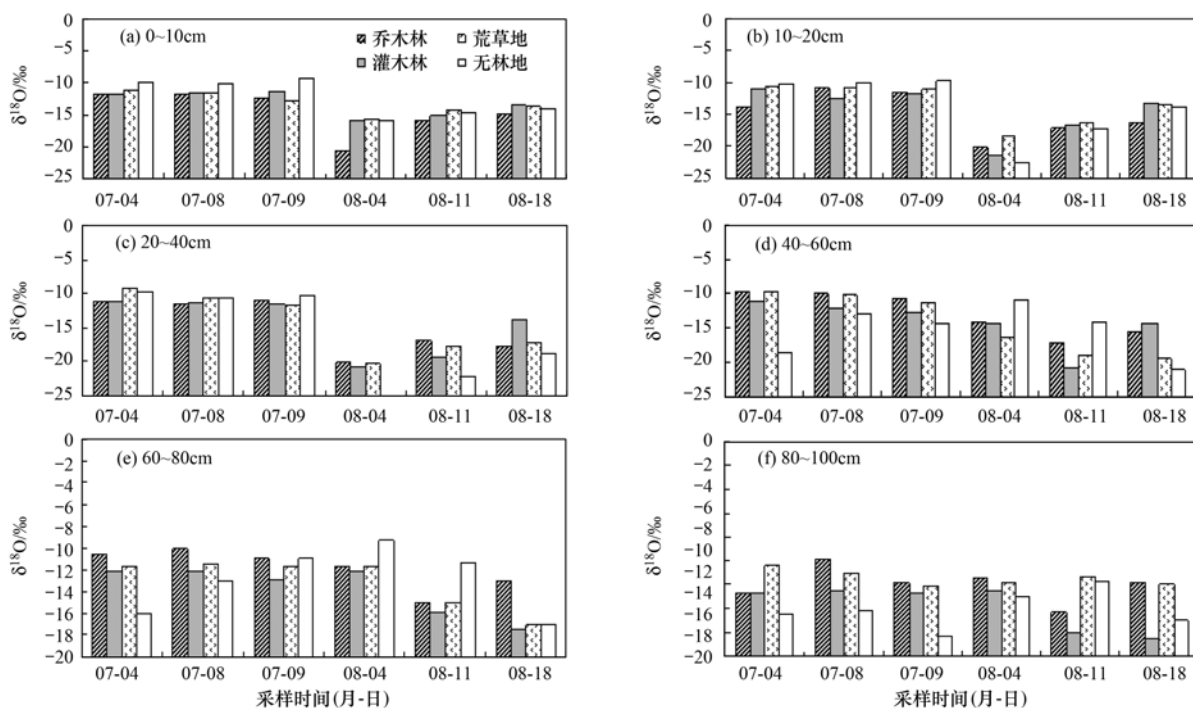


图4 不同深度土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 的时间变化特征

Fig. 4 Temporal variation characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in soil water in different depths

2.2.3 不同林分土壤水同位素垂向分布特征

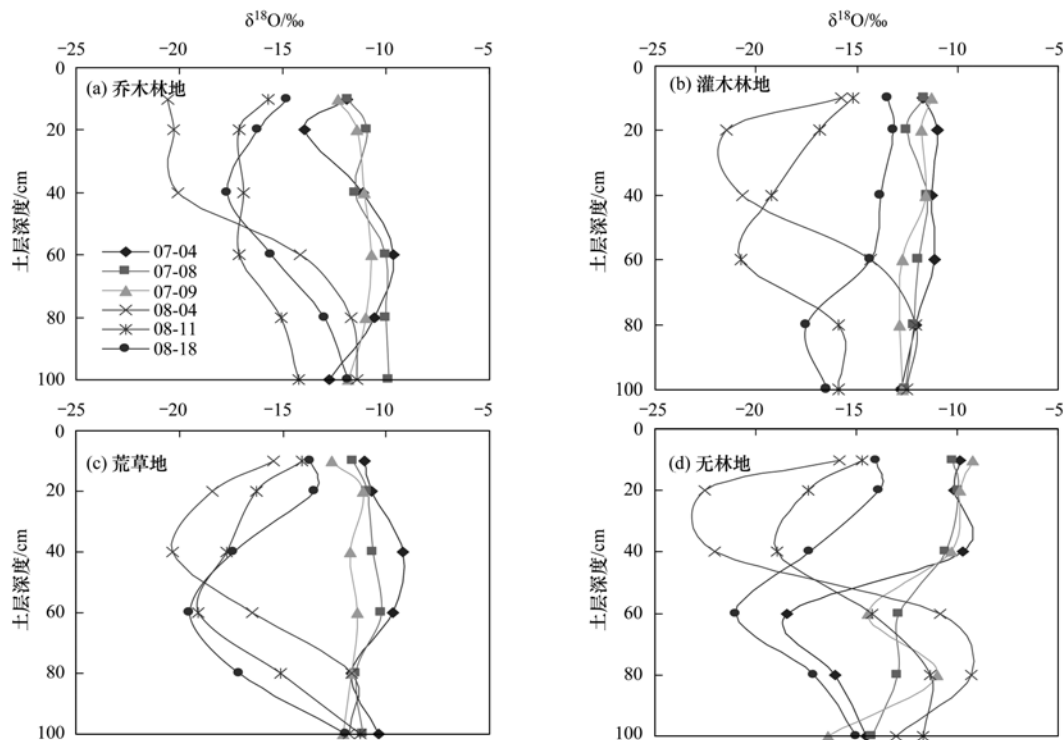
由图5可知,4种不同林分类型下土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在土壤表层差异较大,而在土壤深层基本趋于一致. 这是因为浅层土壤水易受降水混合和蒸发的影响,同位素组成变化较大;而深层土壤水接受降水补给有限且降水与土壤水已混合均匀,因此其同位素组成变化较小^[30].

纵观整个采样期内各个林分不同土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化情况,可以发现,各林分的表层土壤同位素值和深层土壤同位素值在7月差异不明显,基本趋于稳定,且4种不同林分类型下土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在土壤表层差异较小. 然而,各林分不同土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在8月波动变化幅度较大,其中,乔木林以20~40 cm土层的波动幅度最为明显;灌木林、荒草地和无林地以20~40 cm和40~60 cm土层的波动幅度最大. 当土层深度达到80~100 cm时,4种

不同林分类型土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值恢复到稳定状态,说明蒸发对深层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的影响极其微弱.

总体来说,4种不同林分类型下的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在垂向空间上的变化基本上有3种类型:乔木林和荒草地在7月4日、7月8日和7月9日的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值垂向空间变化上, $\delta^{18}\text{O}$ 值随着土层深度的增加而变大,说明降水入渗推动了混合水的向下移动;而灌木林地和无林地在此期间其土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值垂向空间变化上随着土层深度的增加而减小;而在8月4日、8月11日和8月18日,4种不同林分类型下的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值均随着土层深度的增加呈现出先减小后变大的趋势,说明表层土壤水分通透性较强,水分入渗过程中在表层的滞留较少,且深层土壤的蓄水能力才是衡量整个林分涵养水源多少的根本.

乔木林和荒草地两种林分类型整体上深层次土壤水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值要偏高于表层土壤,而对于灌木林

图5 不同林分土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值垂向变化特征Fig. 5 Vertical variations of $\delta^{18}\text{O}$ in soil water under different forest types

和无林地,其变化趋势则恰恰相反,即其深层土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值要整体偏低,这表明不同的土地利用方式降水入渗的机制不同。

Germann 等^[31]研究发现,大孔隙优先流可能是深层土壤水分来源的唯一通道;且土壤水稳定同位素变化受大气降水稳定同位素、地表蒸发、土壤水的水平迁移和垂直运动、植被类型以及人类活动等多种因素的影响^[32]。因此,乔木林和荒草地的深层土壤水同位素值的变化证明了降水入渗过程中存在着优先流形式的下渗。乔木林和荒草地由于植被根系发达,具备了形成大孔隙的条件,同时也为优先流的产生提供了必要的路径。而对于灌木林和无林地而言,由于植被覆盖程度和人为扰动等因素的影响,土壤压实度较大,大孔隙较少,其降水下渗速度较慢且下渗过程主要以活塞流形式进行,从而其土壤表层的稳定同位素较富集。

3 结论

(1) 元阳梯田水源区大气降水线方程为: $\delta\text{D} = 6.8384\delta^{18}\text{O} - 5.6921$ ($R^2 = 0.8787, n = 20$), 其斜率和截距均小于全球大气降水线,说明当地降水过程中可能存在再蒸发的过程且受局地水汽蒸发影响较大。

(2) 土壤水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值的关系为: $\delta\text{D} = 7.7535\delta^{18}\text{O} + 5.5889$ ($R^2 = 0.9829, n = 143$); δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值为 -100‰ 和 -13.7‰ , 明显低于大气降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值。表明在研期间,土壤水并不单纯来自降水,更多的是原有土壤水与当季降水的混合,且土壤水与降水氢氧同位素相比明显偏负,说明土壤水更多是来自前期降水。

(3) 4 种不同林分类型下,表层土壤剖面上的 $\delta^{18}\text{O}$ 值波动变化幅度较大,一定程度上体现了土壤蒸发等同位素分馏效应。随着土层深度的增加, $\delta^{18}\text{O}$ 值的波动变化越来越小,尤其以 $80 \sim 100 \text{ cm}$ 土层表现最为明显,其 $\delta^{18}\text{O}$ 值基本趋于稳定。说明浅层土壤水易受降水混合和蒸发影响,其同位素组成变化较大;而深层土壤水接受降水补给有限,且降水与土壤水已混合均匀,因此其同位素组成变化较小。

(4) 乔木林和荒草地的深层土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值要高于表层土壤,而对于灌木林和无林地,其变化趋势则恰恰相反,表明研究区的降水入渗过程具有优先流下渗和活塞流下渗两种特征。乔木林和荒草地主要以优先流下渗为主,灌木林和无林地主要以活塞流下渗为主。明确研究区土壤水的下渗机制,对于揭示元阳梯田水源区水分循环机制及其可持续发展具有重要的意义。

致谢:本研究在氢氧同位素的测定时,得到了中国科学院寒区旱区环境与工程研究所同位素实验室的帮助,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] 雷志栋, 胡和平, 杨诗秀. 土壤水研究进展与评述[J]. 水科学进展, 1999, **10**(3): 311-318.
- [2] 肖德安, 王世杰. 土壤水研究进展与方向评述[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(3): 1182-1188.
- [3] 刘君, 卫文, 张琳, 等. 土壤水 D 和 ^{18}O 同位素在揭示包气带水分运移中的应用[J]. 勘察科学技术, 2012, (5): 38-43.
- [4] 徐庆, 冀春雷, 王海英, 等. 氢氧碳稳定同位素在植物水分利用策略研究中的应用[J]. 世界林业研究, 2009, **22**(4): 41-46.
- [5] 田立德, 姚檀栋, Tsujimura M, 等. 青藏高原中部土壤中稳定同位素变化[J]. 土壤学报, 2002, **39**(3): 289-295.
- [6] Lee K S, Kim J M, Lee D R, *et al.* Analysis of water movement through an unsaturated soil zone in Jeju Island, Korea using stable oxygen and hydrogen isotopes[J]. Journal of Hydrology, 2007, **345**(3-4): 199-211.
- [7] Mueller M H, Alaoui A, Kuells C, *et al.* Tracking water pathways in steep hillslopes by $\delta^{18}\text{O}$ depth profiles of soil water[J]. Journal of Hydrology, 2014, **519**(Part A): 340-352.
- [8] 廖聪云, 钟巍, 马巧红, 等. 广州大气降水中稳定同位素对2008年初华南地区冰雪灾害期间水汽来源的反映[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1050-1056.
- [9] 吴锦奎, 杨洪越, 丁永建, 等. 黑河流域大气降水稳定同位素变化及模拟[J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 1857-1866.
- [10] 徐莹莹, 阎百兴, 王莉霞. 三江平原露水水汽来源的氢氧稳定同位素辨析[J]. 环境科学, 2011, **32**(6): 1550-1556.
- [11] 许士国, 刘盈斐, 孙万光. 扎龙湿地包气带土壤水分垂直运移的稳定同位素研究[J]. 水文, 2006, **26**(5): 1-6.
- [12] 侯士彬, 宋献方, 于静洁, 等. 太行山区典型植被下降水入渗的稳定同位素特征分析[J]. 资源科学, 2008, **30**(1): 86-92.
- [13] 包为民, 王涛, 胡海英, 等. 降雨入渗条件下土壤水同位素变化实验[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2009, **48**(6): 132-137.
- [14] 田日昌, 陈洪松, 宋献方, 等. 湘西北红壤丘陵区土壤水运移的稳定性同位素特征[J]. 环境科学, 2009, **30**(9): 2747-2754.
- [15] 和弦, 宋维峰, 彭永刚, 等. 元阳梯田全福庄流域水源涵养林的植物多样性分析[J]. 水土保持研究, 2012, **19**(5): 110-119.
- [16] 李阳芳, 宋维峰, 和俊, 等. 元阳梯田核心区不同土地利用类型土壤水文效应研究[J]. 水土保持研究, 2012, **19**(6): 54-57.
- [17] 段兴凤, 宋维峰, 李健, 等. 云南省元阳梯田水源区森林土壤入渗特性研究[J]. 水土保持通报, 2011, **31**(4): 47-52.
- [18] 王涛, 包为民, 陈翔, 等. 真空蒸馏技术提取土壤水实验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, **37**(6): 660-664.
- [19] 张娟. 元阳梯田水源区土壤水分时空分布特征研究[D]. 昆明: 西南林业大学, 2014.
- [20] 刘文茹, 沈业杰, 彭新华, 等. 提取方式对土壤和植物水分提取率的影响及其氢氧同位素分析[J]. 生态学杂志, 2012, **31**(7): 1870-1875.
- [21] 章光新, 何岩, 邓伟. 同位素 D 与 ^{18}O 在水环境中的应用研究进展[J]. 干旱区研究, 2004, **21**(3): 225-229.
- [22] 涂林玲, 王华, 冯玉梅. 桂林地区大气降水的 D 与 ^{18}O 同位素的研究[J]. 中国岩溶, 2004, **23**(4): 304-309.
- [23] 徐庆, 刘世荣, 安树青, 等. 卧龙地区大气降水氢氧同位素特征的研究[J]. 林业科学研究, 2006, **19**(6): 679-686.
- [24] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. Science, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [25] 刘进达, 赵迎昌, 刘恩凯, 等. 中国大气降水稳定同位素时空分布规律探讨[J]. 勘察科学技术, 1997, (3): 34-39.
- [26] 杨永刚, 李彩梅, 秦作栋, 等. 汾河源区不同景观带水文过程研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2108-2113.
- [27] 陈中笑, 程军, 郭品文, 等. 中国降水稳定同位素的分布特点及其影响因素[J]. 大气科学学报, 2010, **33**(6): 667-679.
- [28] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 我国南部夏季季风降水水汽来源的稳定同位素证据[J]. 自然资源学报, 2007, **22**(6): 1004-1012.
- [29] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, **16**(4): 436-468.
- [30] 程立平, 刘文兆. 黄土塬区几种典型土地利用类型的土壤水稳定同位素特征[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(3): 651-658.
- [31] Germann P F, Edwards W M, Owens L B. Profiles of bromide and increased soil moisture after infiltration into soils with macropore[J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, **48**(2): 237-244.
- [32] 马雪宁, 张明军, 李亚举, 等. 土壤水稳定同位素研究进展[J]. 土壤, 2012, **44**(4): 554-561.

CONTENTS

Hygroscopic Properties of Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing in Spring	XU Bin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Relative Humidity and Aerosol Physicochemical Properties on Atmospheric Visibility in Northern Suburb of Nanjing	YU Xing-na, MA Jia, ZHU Bin, <i>et al.</i> (1919)
Pollution Characteristics and Light Extinction Effects of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter Hazy Days at North Suburban Nanjing ...	ZHOU Yao-yao, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1926)
Characteristics of Winter Atmospheric Mixing Layer Height in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Their Relationship with the Atmospheric Pollution	LI Meng, TANG Gui-qian, HUANG Jun, <i>et al.</i> (1935)
Process-based Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Paint Industry in the Yangtze River Delta, China	MO Zi-wei, NIU He, LU Si-hua, <i>et al.</i> (1944)
Concentrations and Speciation of Dissolved Heavy Metal in Rainwater in Guiyang, China	ZHU Zhao-zhou, LI Jun, WANG Zhi-ru (1952)
Situation and Characteristics of Air Pollutants Emission from Crematories in Beijing, China	XUE Yi-feng, YAN Jing, TIAN He-zhong, <i>et al.</i> (1959)
Emission Characteristics of Water-Soluble Ions in Fumes of Coal Fired Boilers in Beijing	HU Yue-qi, MA Zhao-hui, FENG Ya-jun, <i>et al.</i> (1966)
Analysis on Mechanism of Rainout Carried by Wet Stack of Thermal Power Plant	OUYANG Li-hua, ZHUANG Ye, LIU Ke-wei, <i>et al.</i> (1975)
Removal Characteristics of Elemental Mercury by Mn-Ce/molecular Sieve	TAN Zeng-qiang, NIU Guo-ping, CHEN Xiao-wen, <i>et al.</i> (1983)
Indoor Exposure to Particle-Bound BFRs via Inhalation	LI Xiu-wen, ZENG Hui, NI Hong-gang (1989)
Organic Carbon and Elemental Carbon in Forest Biomass Burning Smoke	HUANG Ke, LIU Gang, ZHOU Li-min, <i>et al.</i> (1998)
Atmospheric Particle Retaining Function of Common Deciduous Tree Species Leaves in Beijing	WANG Bing, WANG Xiao-yan, NIU Xiang, <i>et al.</i> (2005)
Photonic Efficiency of Ethyl Acetate Photolysis in Gas Phase: Dependence on Wavelength and Catalyst	FANG Xue-hui, ZHAO Jie, SHU Li, <i>et al.</i> (2010)
Phytoplankton Light Absorption Properties During the Blooms in Adjacent Waters of the Changjiang Estuary	LIU Yang-yang, SHEN Fang, LI Xiu-zhen (2019)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Offshore Marine Area of Shenzhen	LIU Bao-lin, ZHANG Hong, XIE Liu-wei, <i>et al.</i> (2028)
Composition and Environmental Effects of LFOM and HFOM in "Incense-Ash" Sediments of West Lake, Hangzhou, China	LI Jing, ZHU Guang-wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (2038)
Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from the Heavily Polluted Area of Xiaoqing River	HUANG Ying, LI Yong-xia, GAO Fu-wei, <i>et al.</i> (2046)
Response of Algae to Nitrogen and Phosphorus Concentration and Quantity of Pumping Water in Pumped Storage Reservoir	WAN You-peng, YIN Kui-hao, PENG Sheng-hua (2054)
Temporal and Spatial Variation of Nutrients and Chlorophyll a, and Their Relationship in Pengxi River Backwater Area, Three Gorges Reservoir	ZHANG Lei, WEI Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2061)
Environmental Effects of Algae Bloom Cluster: Impact on the Floating Plant Water Hyacinth Photosynthesis	BAO Xian-ming, GU Dong-xiang, WU Ting-ting, <i>et al.</i> (2070)
<i>In Situ</i> High-Resolution Analysis of Labile Phosphorus in Sediments of Lake Chaohu	LI Chao, WANG Dan, YANG Jin-yan, <i>et al.</i> (2077)
Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon Stable Isotope of Shibing Dolomite Karst Area in Guizhou Province	XIAO Shi-zhen, LAN Jia-cheng, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2085)
Stable Isotope Characteristics in Different Water Bodies in Changsha and Implications for the Water Cycle	LI Guang, ZHANG Xin-ping, ZHANG Li-feng, <i>et al.</i> (2094)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes of Soil Water in the Water Source Area of Yuanyang Terrace	ZHANG Xiao-juan, SONG Wei-feng, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2102)
Performance of Grass Swales for Controlling Pollution of Roadway Runoff in Field Experiments	HUANG Jun-jie, SHEN Qing-ran, LI Tian (2109)
Performance Study of Bromochloroacetonitrile Degradation in Drinking Water by Fe/Cu Catalytic Reduction	DING Chun-sheng, MA Hai-long, FU Yang-ping, <i>et al.</i> (2116)
Catalytic Degradation of Diclofenac Sodium over the Catalyst of 3D Flower-like α -FeOOH Synergized with H ₂ O ₂ Under Visible Light Irradiation	XU Jun-ge, LI Yun-qin, HUANG Hua-shan, <i>et al.</i> (2122)
Degradation of Organic Sunscreens 2-hydroxy-4-methoxybenzophenone by UV/H ₂ O ₂ Process: Kinetics and Factors	FENG Xin-xin, DU Er-deng, GUO Ying-qing, <i>et al.</i> (2129)
Photocatalytic Degradation of Perfluorooctanoic Acid by Pd-TiO ₂ Photocatalyst	LIU Qing, YU Ze-bin, ZHANG Rui-han, <i>et al.</i> (2138)
Efficient Photolysis of Acid Orange 7 Using Low-frequency Electrodeless Lamp	WU Peng, WU Jun, GAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (2147)
Degradation of 3,4-Dichlorobenzotrifluoride by Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ Heterogeneous Fenton-Like Systems	SUN Zheng-nan, YANG Qi, JI Dong-li, <i>et al.</i> (2154)
Preparation of Coated CMC-Fe ⁰ Using Rheological Phase Reaction Method and Research on Degradation of TCE in Water	FAN Wen-jing, CHENG Yue, YU Shu-zhen, <i>et al.</i> (2161)
Degradation Mechanism of 4-Chlorophenol on a Pd-Fe/graphene Multifunctional Catalytic Cathode	QI Wen-zhi, WANG Fan, WANG Hui, <i>et al.</i> (2168)
Removal Kinetics and Mechanism of Aniline by Manganese-oxide-modified Diatomite	XIAO Shao-dan, LIU Lu, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (2175)
Adsorption Characteristics of Nitrate and Phosphate from Aqueous Solution on Zirconium-Hexadecyltrimethylammonium Chloride Modified Activated Carbon	ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2185)
Removal Congo Red from Aqueous Solution Using Poly (AM-co-DVB)	ZHANG Luan-luan, LIAO Yun-wen, GAO He-jun, <i>et al.</i> (2195)
Energy Consumption Comparison and Energy Saving Approaches for Different Wastewater Treatment Processes in a Large-scale Reclaimed Water Plant	YANG Min, LI Ya-ming, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (2203)
Transformation Regularity of Nitrogen in Aqueous Product Derived from Hydrothermal Liquefaction of Sewage Sludge in Subcritical Water	SUN Yan-qing, SUN Zhen, ZHANG Jing-lai (2210)
Start-up Performance of ANAMMOX Enrichment with Different Inoculated Sludge in Anaerobic Baffled Reactor	ZHANG Hai-qin, WANG Fan-fan, LI Yue-han, <i>et al.</i> (2216)
Influencing Factors for Hydrolysis of Sewage Sludge Pretreated by Microwave-H ₂ O ₂ -OH Process	JIA Rui-lai, WEI Yuan-song, LIU Ji-bao (2222)
Enrichment and Characterization of a Denitrifying Bacteria Consortium from Lihe River's Sediment	YONG Jia-jun, CHENG Xiao-ying (2232)
Investigation for Filamentous Bacteria Community Diversity in Activated Sludge Under Various Kinds and Concentration Conditions of Antibiotics	WANG Run-fang, WANG Qin, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2239)
Isolation and Identification of Petroleum Degradation Bacteria and Interspecific Interactions Among Four <i>Bacillus</i> Strains	WANG Jia-nan, SHI Yan-yun, ZHENG Li-yan, <i>et al.</i> (2245)
Effects of Dissimilatory Reduction of Goethite on Mercury Methylation by <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1	SI You-bin, SUN Lin, WANG Hui (2252)
Effect of Root Iron Plaque on Norfloxacin Uptake by Rice	MA Wei, BAO Yan-yu (2259)
Effects of Tillage on Soil Respiration and Root Respiration Under Rain-Fed Summer Corn Field	LU Xing-li, LIAO Yun-cheng (2266)
Seasonal Provincial Characteristics of Vertical Distribution of Dust Loadings and Heavy Metals near Surface in City	LI Xiao-yan, ZHANG Shu-ting (2274)
Characteristics of Phthalic Acid Esters in Agricultural Soils and Products in Areas of Zhongshan City, South China	LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (2283)
Variations and Influencing Factors of Oral Bioaccessibility of Polybrominated Diphenyl Ethers in Soils Using an <i>In-vitro</i> Gastrointestinal Model	ZHANG Yun-hui, LIU Wei-jian, CHENG Fang-fang, <i>et al.</i> (2292)
Impacts of Biochar Input on Mineralization of Native Soil Organic Carbon	CHEN Wei, HU Xue-yu, LU Hai-nan (2300)
Effects of Remedies on the Remediation of Typical Pb and Zn-contaminated soil in Huanjiang, Guangxi	ZENG Wei-quan, SONG Bo, YUAN Li-zhu, <i>et al.</i> (2306)
Mechanism Study of the Smectite-OR-SH Compound for Reducing Cadmium Uptake by Plants in Contaminated Soils	ZENG Yan-jun, ZHOU Zhi-jun, ZHAO Qiu-xiang (2314)
Land Use Pattern Change and Regional Sustainability Evaluation of Wetland in Jiaogang Lake	YANG Yang, CAI Yi-min, BAI Yan-ying, <i>et al.</i> (2320)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年6月15日 第36卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 6 Jun. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧 阳 自 远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号, 邮政编码: 100085) 电话: 010-62941102, 010-62849343 传真: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行