

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

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

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示 高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康(1141)

2013年1月北京市PM_{2.5}区域来源解析 李璇,聂滕,齐珺,周震,孙雪松(1148)

2013年1月北京市一次空气重污染成因分析 程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅(1154)

上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征 常燕,冯冲,瞿建国,张经(1164)

厦门春季PM₁₀中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析 张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成(1173)

硫氧同位素示踪南京北郊大气PM_{2.5}中硫酸盐来源 魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝(1182)

结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程 包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠(1187)

春季华东高山背景区域PM_{2.5}和PM_{2.5-10}中水溶性无机离子特征 苏彬彬,张智胜,陶俊,许榕洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇(1195)

落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究 杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹(1202)

四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征 何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪(1208)

深圳市船舶排放清单与时空特征研究 杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏(1217)

超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性 孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗(1227)

空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征 张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹(1234)

基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应 靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽(1241)

黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响 张永领,王明仕,董玉龙(1249)

调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响 王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远(1256)

春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响 于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚(1263)

降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析 任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春(1270)

北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价 钟惠舟,韦朝海(1277)

丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析 李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏(1285)

三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例 操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺(1293)

营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响 王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖(1301)

一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究 杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏(1309)

昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析 梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明(1317)

河道曝气提升河流水质的WASP模型研究 朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽(1326)

γ辐射降解水中的盐酸环丙沙星的研究 祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静(1332)

电化学氢化物发生法处理含镉废水及对镉的回收 陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼(1338)

Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水 孙文静,王亚曼,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳(1345)

生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素 孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪(1352)

308 nm光作用下α-Fe₂O₃表面HNO₃的光解 陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强(1359)

L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚 何家洪,徐强,丁武泉,李强(1365)

酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究 许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博(1374)

枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性 马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用(1379)

嗜咪降解菌筛选及其对焦化废水强化处理 李静,李文英(1385)

Fe³⁺对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N₂O释放的影响 李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建(1392)

内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究 赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉(1399)

利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻 王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东(1406)

进水渗滤液总氮和BOD₅/TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响 杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰(1412)

重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析 师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先(1417)

湖南攸县典型煤矿和工厂区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析 张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰(1425)

沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响 苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春(1431)

施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响 王秀丽,梁成华,马子惠,韩月(1437)

不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复 邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提(1445)

陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价 齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞(1453)

有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响 王菲,袁婷,谷守宽,王正银(1461)

玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究 程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云(1468)

硼钡交互作用对水稻吸收积累镉和硼的影响 向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐(1474)

丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响 郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新(1481)

滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究 陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁(1489)

不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系 吴静,陈书涛,胡正华,张旭(1497)

工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析 王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮(1507)

《环境科学》征订启事(1216) 《环境科学》征稿简则(1248) 信息(1163,1194,1248,1424)

基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应

靳晓刚, 张明军*, 王圣杰, 朱小凡, 董蕾, 任正果, 陈粉丽

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要: 根据 GNIP 提供的 1985 年 1 月至 2004 年 12 月黄土高原 8 个站点的 409 个降水同位素数据及同期的气象资料, 结合 HYSPLIT 4.9 模型, 分析了该区 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 的时空分布特征, 计算了二次蒸发的比率, 并对不同气象因子影响二次蒸发的程度作了探讨, 得到以下结论: ① 冬季风和夏季风期间, 在黄土高原内由南向北 $\delta^{18}\text{O}$ 呈上升趋势, d 呈下降趋势; 自东向西 $\delta^{18}\text{O}$ 仅在夏季风期间有上升趋势, 而在冬季风期间呈现下降趋势, d 总呈现下降的趋势, $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 的变化幅度可以指示季风的路径。② 该区全年存在二次蒸发效应, 夏季风期间最为明显, 蒸发比率介于 1.51% ~ 5.88% 之间, 平均值为 3.87%。冬季风期间蒸发比率总体较低, 介于 1.06% ~ 5.46% 之间, 平均值也降为 3.03%。黄土高原边缘站点蒸发比率受季风变化影响较大, 而中部站点受季风变化影响较小。③ 温度对二次蒸发的影响较大, 降水量和水汽压其次, 相对湿度较小。此外, 风速和海拔对二次蒸发的影响较弱。

关键词: 稳定同位素; 时空变化; 蒸发比率; 云下二次蒸发效应; 黄土高原

中图分类号: X131; X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1241-08 DOI: 10.13227/j.hjxk.2015.04.014

Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen

JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun*, WANG Sheng-jie, ZHU Xiao-fan, DONG Lei, REN Zheng-guo, CHEN Fen-li

(College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Based on stable isotopes in 409 precipitation samples provided by GNIP and meteorological records at the eight stations in Loess Plateau from January 1985 to December 2004, as well as the trajectory model of HYSPLIT 4.9, the spatial and temporal variations of d -excess and $\delta^{18}\text{O}$ were analyzed. The spatial distribution of secondary evaporation rate and the impact of meteorological factors on below-cloud secondary evaporation were also discussed. The result showed that: ① During summer and winter monsoon periods, $\delta^{18}\text{O}$ showed an uptrend variation and d -excess showed a downtrend variation from south to north in Loess Plateau. From east to west, $\delta^{18}\text{O}$ showed an uptrend variation only in summer monsoon period and a downtrend variation in winter monsoon period. The value of d -excess also showed a downtrend variation. Amplitude of variation $\delta^{18}\text{O}$ and d -excess could indicate the routes of monsoon. ② Secondary evaporation existed on an annual basis, and it was relatively significant during the summer monsoon period, with ranges from 1.51% to 5.88% and an average rate of 3.87%. While winter monsoon became lower, the rates ranged from 1.06% to 5.46%, and the average rate dropped to 3.03%. Monsoon had larger influence on secondary evaporation in margin area of the plateau, while the influence on the central stations was little. ③ Temperature had the highest contribution to secondary evaporation, followed by precipitation amount and water vapor pressure, and relative humidity had a small contribution. Moreover, the influence of wind speed and altitude on secondary evaporation was weak.

Key words: stable isotopes; temporal and spatial changes; evaporation rate; below-cloud secondary evaporation effect; Loess Plateau

大气降水是陆地水资源的主要来源, 环境同位素在大气降水中所占比例虽小, 却能很好地反映水循环过程和环境的演变^[1-2]。降水中同位素组成取决于水汽源区的气象条件和水汽输送过程^[3], 因此, 利用降水中的同位素可以指示水汽来源和水汽变化情况。1961 年全球同位素监测网 (global network of isotopes in precipitation, GNIP) 的建立, 为研究全球及区域水汽循环提供了可靠的基础数据。随着测量手段的不断改进, 氢氧稳定同位素技术得到广泛应用; 例如, 根据降水中的同位素, 揭示降水补给地下水的全过程^[4]。借助冰芯^[5]、湖泊沉积物^[6]、树木年轮^[7]和洞穴堆积物^[8]等所蕴藏的同位

素信息, 恢复和重建古气候、古高程^[2,9]等。

利用稳定同位素技术研究局地水汽蒸发和凝结具有重要意义。瑞利分馏模式^[3]可以定量描述蒸发过程中稳定同位素的分馏机制, 进而可以估计水体的蒸发情况。反之, 如果能够了解云下二次蒸发对氢氧同位素的影响程度, 就可以借助降水中氢氧同位素的变化精确地反映蕴藏在水循环中更有价值的信息^[10]。章新平等^[11]研究发现, 瑞利分馏模式在温度

收稿日期: 2014-09-26; 修订日期: 2014-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41461003, 41161012)

作者简介: 靳晓刚 (1988 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为全球变化与可持续发展, E-mail: jxg_qa@163.com

* 通讯联系人, E-mail: mjzhang2004@163.com

为 20℃ 时模拟的蒸发线与全球大气水线非常接近。但该模式是基于相变平衡分馏的基础上进行的,即水汽一经形成迅速脱离原系统独立存在,且温度是影响蒸发水体中稳定同位素分馏的唯一外部因子^[2,12~13]。这与实际蒸发过程明显不同,蒸发还受相对湿度、水汽压等^[14~15]因子的影响。就雨滴而言,在空中降落过程中经历着不同程度的蒸发^[16]。后来有学者对此问题做过补充^[17],Peng 等^[18]在此基础上提出了水汽贡献率模型,仅根据降水中 d 值计算水面蒸发所产生的水汽贡献率。随后,又对云下二次蒸发做了深入的探讨^[16]。

近年来,开展了许多降水与同位素相关的研究,如陈中笑等^[19]研究了我国降水同位素的分布特点和影响因素,重点分析了我国降水同位素与降水量效应和温度效应的特点;柳鉴容等^[9]探讨了西北地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 特征及水汽来源,揭示了西北地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度呈正相关关系^[20,21];李小飞等^[22]分析黄河流域氢氧同位素环境意义时发现,流域内存在明显的二次蒸发现象。但有关黄土高原云下二次蒸发定量计算的研究相对匮乏,仅 Ma 等^[23]对兰州地区做过探讨,得出夏季风期间二次蒸发比率介于 2.5%~9.3% 之间,平均值为 5.8%。因此,进行该区二次蒸发效应及其影响因素的研究,不仅有助于深刻认识黄土高原水汽循环的基本模式,同时也为该区水资源合理利用和综合管理提供相关信息和基础数据。本文在总结前人研究经验的基础上,分析了该区 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 的时空分布特征,借助水滴蒸发模型定量计算了冬、夏季风期间二次蒸发比率,并探讨了二次蒸发差异存在的原因。此外,还分析了相对湿度、温度、降水量等因子对二次蒸发的影响程度。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原位于我国中部,东临华北平原,北接内

蒙古高原,西与青藏高原相毗邻。地处 33°43'~41°16' N, 100°54'~114°33' E, 平均海拔在 1 000~2 000 m 之间,地势西北高、东南低^[24]。因其黄土分布集中,土质疏松而著称,地貌主要以黄土塬、梁、峁为主,沟壑纵横,地表支离破碎^[25]。该区位于我国大陆腹地,属温带大陆性季风气候,多年平均降水量为 464.1 mm,年平均气温 8.8℃^[26],气候特点是降水量少变率大,冷热季节明显^[27]。植被从暖温带阔叶林向典型草原和荒漠草原过渡,覆盖率自东南向西北逐渐降低。由于近期人类活动加剧和长期不合理利用土地,从而促进了生态环境的进一步恶化^[28]。

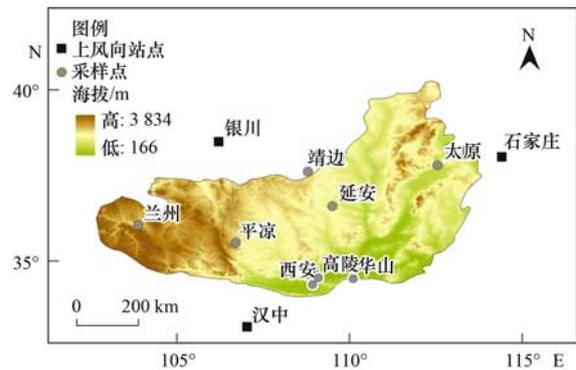


图 1 研究区概况与采样点位置分布示意

Fig. 1 Locations of the study area and sampling stations in Loess Plateau

1.2 数据及其算法

本研究中降水氢氧同位素数据来源于以下两部分:一部分(兰州、银川、平凉、西安、靖边、太原、石家庄)来自 GNIP (<http://isohis.iaea.org>);另一部分(延安、高陵、华山、汉中)来自相关研究^[29]。选定了分布在黄土高原上 8 个站点(靖边紧邻黄土高原边缘,故纳入研究)的降水同位素数据(表 1),以降水集中的夏季风期间(6~9 月)和风力强劲的冬季风期间(10 月~次年 5 月)为研究时段。其他 3 个站点(银川、汉中、石家庄)作为上风向数据参与后续计算。

表 1 黄土高原降水同位素站点信息

Table 1 Information of precipitation stable isotope stations in the Loess Plateau

站点	纬度	经度	海拔/m	年平均气温/℃	年平均降水量/mm	采样时段(年-月)	样品来源
兰州	36°03'	103°52'	1 517	9.8	311.7	1985-01~1987-12 1996-01~1999-12	GNIP
平凉	35°31'	106°42'	1 570	10.0	501.2	2003-01~2004-12	GNIP
西安	34°18'	108°55'	397.5	13.9	571.4	1985-01~1993-12	GNIP
高陵	34°31'	109°05'	377.6	13.0	550.0	1986-04~1987-03	文献[29]
华山	34°29'	110°05'	2 064.9	6.1	591.9	1986-04~1987-03	文献[29]
延安	36°36'	109°30'	958.5	9.9	507.7	1986-04~1987-03	文献[29]
靖边	37°36'	108°47'	1 351	7.8	395.4	2002-01~2003-12	GNIP
太原	37°46'	112°33'	778	10.0	432.1	1986-01~1988-12	GNIP

应用 HYSPLIT 4.9 模型和 ArcGIS 9.3 软件, 结合美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心 (national centers for environmental prediction/national center for atmospheric research, NCEP/NCAR) 提供的 1985 ~ 2004 年全球再分析资料以及中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>) 同期的气象资料, 对研究时段内发生降水气团的 (每日 06:00 为日降水最集中的时段^[30,31]) 后向轨迹进行了模拟和聚类分析。

聚类分析结果显示, 黄土高原夏、冬季风期间到达各站点的水汽来源路径不同, 权重差异较大。图 2 是西安站水汽来源情况的气流后向轨迹聚类图, 从图 2(a) 可以看出, 西安夏季风期间水汽来源路径有 3 条, 一条来自东面(21%), 另外两条分别来自西北(20%)和东南(59%)方向; 图 2(b) 显示冬季风期间水汽来源路径有两条, 西北(21%)方向和正东(79%)方向。其他站点的聚类轨迹权重如表 2 所示。

表 2 黄土高原夏、冬季风期间上风向气团到达各站点的水汽权重/%

Table 2 Vapor weights arriving the stations upon upwind over summer and winter monsoon periods in Loess Plateau/%

季风期	上风向点	兰州	平凉	西安	高陵	华山	延安	靖边	太原
夏季风	银川	22	11	20	18	16	34	5	17
	石家庄			21	28	39	66	76	83
	汉中	78	89	59	54	45		19	
冬季风	银川	25	30	21	20	18	17	15	44
	石家庄						83	37	56
	汉中	75	70	79	80	82		48	

自 Stewart^[32] 在实验基础上建立水滴蒸发模型以来, 云下二次蒸发效应被广泛应用于区域水循环过程的研究中^[33]。但此模型涉及的参数较多, 部分数据易受采样条件的限制而无法满足原始公式。因此, 本研究采用 Peng 等^[34] 简化后的模型计算黄土高原的二次蒸发比率。其表达式为:

$$E(\%) = \frac{d_{st} - d_{air}}{-1.1}$$

式中, E 为云下二次蒸发的比率, d_{st} 为降水中的过量气, d_{air} 为上风向气团中的过量气。

2 结果与分析

2.1 黄土高原大气水线方程

全球大气水线 (global meteoric water line, GMWL) 和局地大气水线 (local meteoric water line, LMWL) 是研究水文循环过程的重要参考线, 1961 年 Craig^[35] 在调查降水中 $\delta^{18}O$ 和 δD 的含量时发现其符

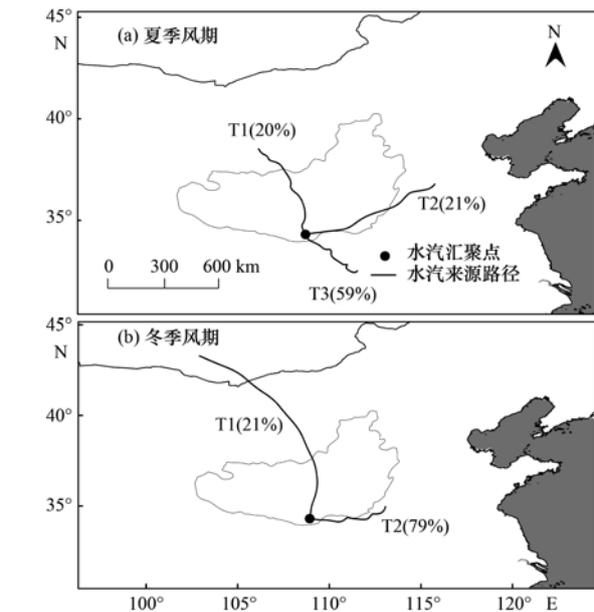


图 2 西安站 1985 ~ 1993 年夏季风和冬季风期间气流后向轨迹聚类图

Fig. 2 Backward trajectories cluster in Xi'an during summer and winter monsoon periods from 1985 to 1993

合 $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$, 该式被命名为全球大气水线方程 (GMWL)。计算得到黄土高原的大气水线方程 (LMWL) 为:

$$\delta D = 7.022 \delta^{18}O + 1.720$$

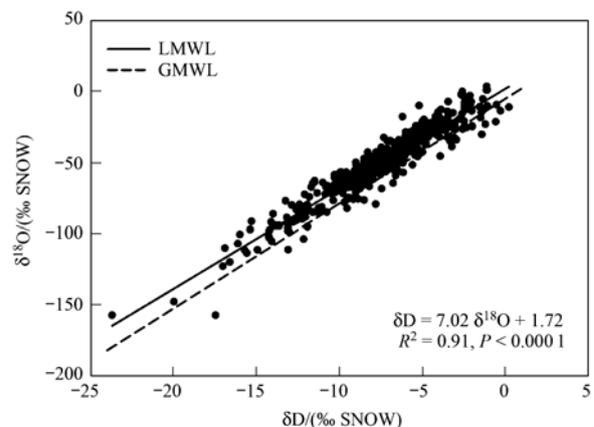


图 3 黄土高原大气水线方程

Fig. 3 Local Meteoric Water Line in Loess Plateau

通过与全球大气水线方程(图3)对比发现,黄土高原大气水线方程的斜率和截距均小于全球大气水线方程.因凝结物在未饱和大气中降落时,受到非平衡蒸发的影响,导致重同位素富集,故大气水线的斜率和截距均较低^[36].

2.2 $\delta^{18}\text{O}$ 与 d 的时空变化

$\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 常被作为核心指标用于同位素研究中^[2],由以上两因子得到的过量氘 d ($d = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$) 不仅能够反映同位素分馏过程中的不平衡差异性,还能很好地揭示隐藏在水汽中更多的信息^[33,37].

夏季风期间,黄土高原上 $\delta^{18}\text{O}$ 与 d 的空间分布

状况[图4(a)与图4(c)].通过图4(a)可以发现除平凉站 $\delta^{18}\text{O}$ 较低外,从南部的华山站到北部的靖边站, $\delta^{18}\text{O}$ 从 -10.36‰ 升高到 -6.62‰ ,呈现上升趋势; d 从 11.58‰ 下降到 3.56‰ ,呈现下降趋势,下降幅度较大.类似地,从高原的东部到西部, $\delta^{18}\text{O}$ 呈现上升趋势的同时 d 也呈现下降趋势. $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 的空间变化趋势与夏季风到达该区的路径密切相关. $\delta^{18}\text{O}$ 升高和 d 降低的幅度都说明该区存在较强的云下二次蒸发效应^[16].综合该区气候条件不难看出,夏季高温且降水稀少^[38],加之植被覆盖率低^[39],为蒸发创造了有利的条件^[40].而平凉站夏季 $\delta^{18}\text{O}$ 较低可能与水汽输送过程中同位素贫化有关.

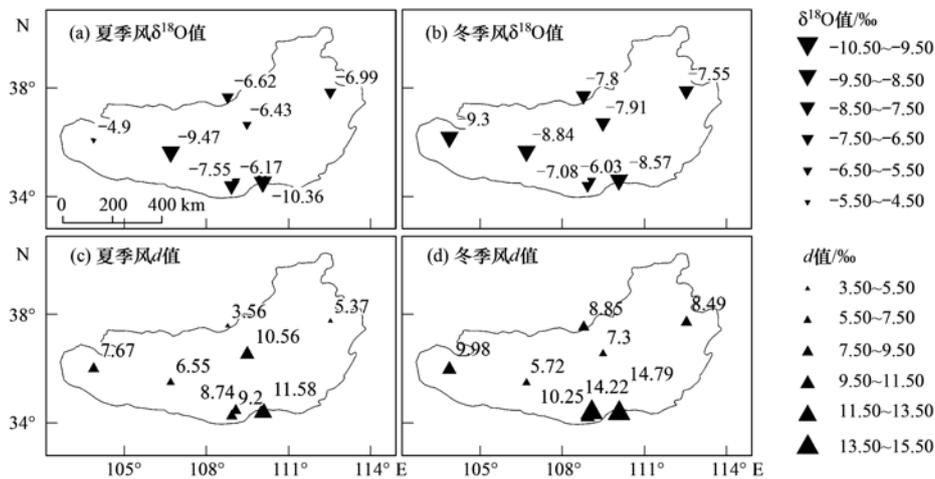


图4 黄土高原夏季风和冬季风期间 $\delta^{18}\text{O}$ 与 d 的空间分布

Fig. 4 Spatial and temporal distribution of d and $\delta^{18}\text{O}$ over summer and winter monsoon periods in Loess Plateau

随着夏季风的撤离,冬季风占领了该区域.从图4(b)与图4(d)中可以看出,从南部的华山站到北部的靖边站, $\delta^{18}\text{O}$ 从 -8.57‰ 升高到 -7.80‰ ,呈现上升趋势; d 由 14.97‰ 下降到 8.85‰ ,呈现下降趋势.自东向西 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 都有下降的趋势,下降的幅度没有由南向北的大,由南向北 $\delta^{18}\text{O}$ 的升高和 d 值的降低同样表明这期间也存在云下二次蒸发效应.黄土高原冬、春季气候干燥且多风^[38],可能是导致 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 空间变化的直接原因.除受冬季风影响外,还可能与该区深居内陆,水汽补给匮乏,降水量较少且多为固态有关.

相比之下,到达黄土高原的夏季风和冬季风的路径和强弱不同,是造成 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 空间分布差异的主要原因.无论在夏季风还是冬季风期间,黄土高原中部站点(平凉和延安) $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 的变化幅度较小.而南部站点(西安、高陵和华山),冬季风期间 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 值明显高于夏季风期间,呈现夏低冬高的趋势.

黄土高原全年都存在云下二次蒸发效应, $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 的变化幅度反映了蒸发程度的强弱.

2.3 黄土高原云下二次蒸发效应的探讨

云下二次蒸发效应曾被用于探明水资源的时空分布上,并取得了一定的成果^[10,41].为了建立黄土高原水汽循环模式,结合 HYSPLIT 4.9 模拟结果选取了季风路径上的银川、汉中、石家庄为上风向点,把上风向夏季风、冬季风期间 d 的多年平均值作为季风气团中的过量氘(d_{air}),按权重计算得到各站点上风向过量氘(d_{air})后,代入简化后的水滴蒸发模型中进行计算.

结果表明,夏季风期间,黄土高原内二次蒸发效应明显,其蒸发比率介于 $1.51\% \sim 5.88\%$ 之间,平均值为 3.87% .从南部的华山站到北部的靖边站,蒸发比率由最小值 1.51% 逐渐增大到 5.88% ,由南向北逐渐增大.从图5(a)可以看出,高原南部站点的蒸发比率明显低于西部、北部和东部的站点,

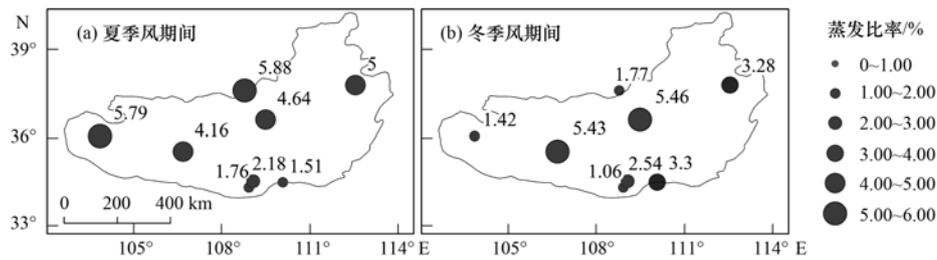


图5 黄土高原夏季风和冬季风期间二次蒸发比率分布

Fig. 5 Spatial distribution of secondary evaporation rate over summer and winter monsoon periods in Loess Plateau

表3 相对湿度、温度、降水量等因子对二次蒸发效应的影响

Table 3 Influence of humidity, temperature and amount of precipitation on secondary evaporation

影响因子	变化范围	斜率	相关系数	$d/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	样本数量
相对湿度/%	<50	7.09	0.972**	9.45	-7.55	38
	50~60	7.10	0.964**	9.06	-7.14	82
	60~70	6.74	0.941**	7.83	-6.96	153
	70~80	6.90	0.942**	8.93	-7.58	105
	80~90	7.10	0.948**	7.90	-8.50	31
温度/°C	<0	6.93	0.964**	14.88	-10.96	37
	0~10	7.08	0.955**	9.95	-7.98	96
	10~15	6.96	0.946**	9.60	-6.65	51
	15~20	6.53	0.921**	5.04	-6.18	60
	20~30	6.80	0.933**	6.37	-6.51	165
降水量/mm	1~10	6.57	0.962**	10.95	-8.41	72
	10~50	6.49	0.932**	8.80	-6.76	179
	50~100	7.00	0.914**	8.34	-6.70	99
	100~150	7.13	0.933**	7.72	-7.68	35
	>150	7.61	0.968**	7.02	-9.07	24
水汽压/hPa	0~5	6.69	0.951**	13.23	-10.02	76
	5~10	6.99	0.939**	8.92	-6.81	103
	10~15	7.13	0.943**	8.75	-5.95	82
	15~20	6.7	0.933**	6.57	-6.38	86
	>20	7.56	0.926**	6.40	-7.99	62
风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0~1	6.81	0.96**	11.13	-7.51	66
	1~2	7.48	0.90**	8.92	-6.91	239
	2~3	6.63	0.91**	8.73	-7.23	43
	3~4	11.18	0.98**	11.49	-10.96	21
	>4	7.44	0.97**	13.13	-5.63	40
海拔/m	377.6~397.5	7.60	0.92**	10.21	-7.08	167
	778	6.42	0.94**	6.78	-7.24	47
	958.5	7.39	0.91**	15.05	-7.43	24
	1351	4.50	0.96**	5.91	-7.15	21
	1517~1570	7.17	0.94**	8.62	-7.54	118
	2064.9	9.58	0.93**	11.09	-9.27	32

1) ** 在 0.01 水平上显著相关

因为南部的西安站、高陵站和华山站南依植被丰富的秦岭,又有过境的东南季风带来的暖湿气流,空气湿度大,因而蒸发比率较低。华山站的蒸发比率为 1.51%,在南部的西安、高陵、华山三站中最低,是由其地处山区海拔高,雨滴降落过程中经历蒸发的

时间短造成的。中部平凉站和延安站的蒸发比率为 4.16% 和 4.64%,比南部三站点高,这与水汽输送过程逐渐贫化导致水汽压降低有关。北部太原站的蒸发比率较高为 5%,与夏季风期间气温较高产生较强的二次蒸发密切相关。靖边站的蒸发比率最高

为 5.88%, 与其所在的位置靠近毛乌素沙漠气候干燥密不可分. 从高原东部太原站到西部的兰州站, 蒸发比率也逐渐增大, 到兰州站时增大到 5.79%; 兰州站较高的蒸发比率, 是其深居内陆到达该站点的水汽稀少造成的; 蒸发比率的变化趋势说明云下二次蒸发效应从东南向西北逐渐增强.

冬季风期间蒸发比率明显不同于夏季风期间, 如图 5(b) 所示, 冬季风期间蒸发比率介于 1.06% ~ 5.46% 之间, 平均值也降为 3.03%. 相比于图 5(a) 而言, 兰州、靖边和太原三站点蒸发比率降低幅度较大, 这与冬季风期间温度降低有关, 西安站蒸发比率降低幅度较小, 可能是过境气流的水汽压年际变化较小所致. 但是平凉、延安、高陵、华山四站点冬季风期间二次蒸发比率比夏季风期间高, 这与近年来黄土高原中部秋、冬季干旱程度加剧密不可分^[42,43]. 而华山站升高的幅度明显大于其他站点, 因为地处山区的华山站多风^[26], 有助于云下二次蒸发的形成. 相对而言, 黄土高原中部站点蒸发比率受季风变化的影响较小.

2.4 二次蒸发效应的敏感因子分析

通常相对湿度、温度、降水量等因子对蒸发比率的影响较大^[12,44], 现将上述各因子划分成不同的范围, 详细探讨各因子对二次蒸发效应的作用.

分析表 3 可知, 上述因子在不同范围时 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的相关性较好, 都在 0.9 以上. 其中, 温度对二次蒸发的影响最为显著; 随着温度的逐渐升高, d 减小的幅度较大, $\delta^{18}\text{O}$ 增大的幅度亦较大; 表明了云下二次蒸发效应较强. 尤其是 0℃ 以下, d 达到最大值 14.88‰, $\delta^{18}\text{O}$ 为最小 -10.96‰, 可能是秋、冬季气温低, 固态降水在下落过程中蒸发微弱, 保留了云层内部同位素最初的特性所致. 当温度处于 10 ~ 20℃ 之间时, 斜率和 d 下降的幅度最大, 说明 10 ~ 20℃ 之间二次蒸发效应较为强烈. 降水量和水汽压对二次蒸发的影响没有温度对其作用的明显, 降水量在 1 ~ 10 mm 和水汽压在 0 ~ 5hPa 时, d 均达到最高 10.95‰ 和 13.23‰, 斜率和 $\delta^{18}\text{O}$ 都较小. 随降水量和水汽压的增加, d 持续减小而 $\delta^{18}\text{O}$ 先增大后减小, 对应斜率也增大到 7.61 和 7.56, 逐渐接近平衡状态下全球大气水线方程的斜率, 体现了二次蒸发效应随降水量和水汽压的增加而减弱. 对比 d 和 $\delta^{18}\text{O}$ 在不同降水量范围内的变化发现, 降水量在 1 ~ 10 mm 和 10 ~ 50 mm 之间时 d 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变化幅度较大, 这说明二次蒸发效应在小降雨事件中体现得更为明显. 相应地, 水汽压在 0 ~ 5 hPa 和 5 ~ 10 hPa 之间, d 减

小和 $\delta^{18}\text{O}$ 增大的幅度较大, 说明水汽压较小时对二次蒸发影响明显. 相对湿度对二次蒸发的影响比上述 3 个因子的影响小, 随相对湿度的增大, $\delta^{18}\text{O}$ 先增大到 -6.96‰ 后减小, d 减小到 7.83‰ 后反而增大, 仅在相对湿度为 50% ~ 70% 时, 斜率、 d 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变化明显. 相对湿度在其他范围变化时, 斜率、 d 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变化幅度均较小; 可能是其他因子的影响较为强烈, 掩盖了相对湿度对二次蒸发作用的结果. 风速和海拔对云下二次蒸发效应影响较弱, 风速在 0 ~ 3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间增大时, d 减小、 $\delta^{18}\text{O}$ 增大, 说明风速对二次蒸发有一定程度的影响; 而风速大于 3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 由 d 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化反映二次蒸发效应的存在性不够明确, 仅较小的风速有助于二次蒸发的形成. 随海拔的增加, 斜率和 d 无明显变化规律, $\delta^{18}\text{O}$ 呈现减小的趋势; 斜率、 d 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化无法反映二次蒸发效应的存在性. 但雨滴在低海拔地区降落到地面的时间比高海拔地区的长, 因而海拔差异对二次蒸发的影响不能忽视.

3 结论

(1) 就整个黄土高原来说, 夏季风期间, 无论从南向北还是从东向西, $\delta^{18}\text{O}$ 总体呈现上升趋势, d 呈现下降趋势. 冬季风期间, 仅由南向北 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 的变化和夏季风期间的变化一致, 而自东向西 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 都有下降的趋势, $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 空间分布状况可指示季风的途径.

(2) 计算发现黄土高原全年都存在云下二次蒸发效应; 夏季风期间最为明显, 蒸发比率介于 1.51% ~ 5.88% 之间, 平均值为 3.87%. 冬季风期间蒸发比率下降, 介于 1.06% ~ 5.46% 之间, 平均值也降为 3.03%. 对比不同季风期各站点蒸发比率发现, 黄土高原边缘站点蒸发比率受季风变化的影响较大, 而中部站点蒸发比率受季风变化的影响较小. 总体而言, 蒸发比率在夏季风期间大于冬季风期间.

(3) 相对湿度、温度、降水量等因子对云下二次蒸发的作用程度不同, 其中温度较大, 降水量和水汽压其次, 相对湿度较小. 此外, 风速和海拔的差异对二次蒸发产生较弱的影响.

参考文献:

- [1] Araguás-Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, **103**(D22): 28721-28742.
- [2] Hoffmann G, Cuntz M, Jouzel J, et al. A systematic comparison

- between the IAEA/GNIP isotope network and the ECHAM 4 atmospheric general circulation model [A]. In: *Isotopes in the Water Cycle: Past, Present and Future of a Developing Science* [C]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2005: 303-320.
- [3] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus*, 1964, **16**(4): 436-468.
- [4] 王仕琴, 宋献方, 肖国强, 等. 基于氢氧同位素的华北平原降水入渗过程 [J]. *水科学进展*, 2009, **20**(4): 495-501.
- [5] Hendricks M B, DePaolo D J, Cohen R C. Space and time variation of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in precipitation: Can paleotemperature be estimated from ice cores? [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, **14**(3): 851-861.
- [6] Hammarlund D, Edwards T W D, Björck S, *et al.* Climate and environment during the Younger Dryas (GS-1) as reflected by composite stable isotope records of lacustrine carbonates at Torreberga, southern Sweden [J]. *Journal of Quaternary Science*, 1999, **14**(1): 17-28.
- [7] Sternberg L S L O. Oxygen stable isotope ratios of tree-ring cellulose: the next phase of understanding [J]. *New Phytologist*, 2009, **181**(3): 553-562.
- [8] Tan M, Cai B G. Preliminary calibration of stalagmite oxygen isotopes from eastern monsoon China with Northern Hemisphere temperatures [J]. *PAGES News*, 2005, **13**(2): 16-17.
- [9] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 西北地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源 [J]. *地理学报*, 2008, **63**(1): 12-22.
- [10] 马潜, 张明军, 王圣杰, 等. 中国西部局地蒸发水汽贡献率探讨 [J]. *地理科学进展*, 2012, **31**(11): 1452-1459.
- [11] 章新平, 姚檀栋, 田立德. 水体蒸发过程中稳定同位素分馏的模拟 [J]. *冰川冻土*, 2003, **25**(1): 65-71.
- [12] Craig H, Gordon L I, Horibe Y. Isotopic exchange effects in the evaporation of water: 1. Low-temperature experimental results [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1963, **68**(17): 5079-5087.
- [13] 田立德, 姚檀栋, 孙维贞, 等. 青藏高原中部水蒸发过程中的氢氧稳定同位素变化 [J]. *冰川冻土*, 2000, **22**(2): 159-164.
- [14] Liu Z F, Tian L D, Chai X R, *et al.* A model-based determination of spatial variation of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ over China [J]. *Chemical Geology*, 2008, **249**(1): 203-212.
- [15] 章新平, 姚檀栋. 全球降水中氧同位素比率的分布特点 [J]. *冰川冻土*, 1994, **16**(3): 202-210.
- [16] Peng H D, Mayer B, Harris S, *et al.* The influence of below-cloud secondary effects on the stable isotope composition of hydrogen and oxygen in precipitation at Calgary, Alberta, Canada [J]. *Tellus B*, 2007, **59**(4): 698-704.
- [17] Gat J R, Bowser C J, Kendall C. The contribution of evaporation from the Great Lakes to the continental atmosphere: estimate based on stable isotope data [J]. *Geophysical Research Letters*, 1994, **21**(7): 557-560.
- [18] Peng H D, Mayer B, Norman A L, *et al.* Modelling of hydrogen and oxygen isotope compositions for local precipitation [J]. *Tellus B*, 2005, **57**(4): 273-282.
- [19] 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.
- [20] 李小飞, 张明军, 李亚举, 等. 西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其水汽输送 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(3): 711-719.
- [21] 陈粉丽, 张明军, 马潜, 等. 兰州及其周边区域大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 特征及其水汽来源 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(10): 3755-3763.
- [22] 李小飞, 张明军, 王圣杰, 等. 黄河流域大气降水氢、氧稳定同位素时空特征及其环境意义 [J]. *地质学报*, 2013, **87**(2): 269-277.
- [23] Ma Q, Zhang M J, Wang S J, *et al.* An investigation of moisture sources and secondary evaporation in Lanzhou, Northwest China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, **71**(8): 3375-3385.
- [24] 杨勤业, 张伯平, 郑度. 关于黄土高原空间范围的讨论 [J]. *自然资源学报*, 1988, **3**(1): 9-15.
- [25] 纪翠玲, 池天河, 齐清文. 黄土高原地貌形态分形算法三维表达应用 [J]. *地球信息科学*, 2006, **7**(4): 127-130.
- [26] 王毅荣. 黄土高原气候系统的基本特征 [J]. *甘肃农业*, 2004, (7): 12-13.
- [27] 李敏蕊. 黄土高原不同时空尺度降水空间变异性研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2012. 9-10.
- [28] 刘咏梅, 李京忠, 夏露. 黄土高原植被覆盖变化动态分析 [J]. *西北大学学报 (自然科学版)*, 2012, **41**(6): 1054-1058.
- [29] 张生春. 陕西省现代大气降水氢氧同位素组成特征研究 [J]. *陕西地质*, 1989, **7**(2): 57-66.
- [30] 段春锋, 曹雯, 缪启龙, 等. 中国夏季夜雨的空间分布特征 [J]. *自然资源学报*, 2013, **28**(11): 1935-1944.
- [31] 刘德祥, 李星敏. 甘肃降水日变化的气候特征 [J]. *甘肃气象*, 1994, **12**(2): 10-12.
- [32] Stewart M K. Stable isotope fractionation due to evaporation and isotopic exchange of falling waterdrops: Applications to atmospheric processes and evaporation of lakes [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, **80**(9): 1133-1146.
- [33] Kong Y L, Pang Z H, Froehlich K. Quantifying recycled moisture fraction in precipitation of an arid region using deuterium excess [J]. *Tellus B*, 2013, **65**: 1-8.
- [34] Peng T R, Wang C H, Huang C C, *et al.* Stable isotopic characteristic of Taiwan's precipitation: A case study of western Pacific monsoon region [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, **289**(3): 357-366.
- [35] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [36] 孟玉川, 刘国东. 长江流域降水稳定同位素的云下二次蒸发效应 [J]. *水科学进展*, 2010, **21**(3): 327-334.
- [37] Peng H, Mayer B, Harris S, *et al.* A 10 year record of stable isotope ratios of hydrogen and oxygen in precipitation at Calgary, Alberta, Canada [J]. *Tellus B*, 2004, **56**(2): 147-159.
- [38] 李振朝, 韦志刚, 文军, 等. 近 50 年黄土高原气候变化特征

- 分析[J]. 干旱区资源与环境, 2008, **22**(3): 57-62.
- [39] 姚玉璧, 李耀辉, 王毅荣, 等. 黄土高原气候与气候生产力对全球气候变化的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2005, **23**(2): 202-208.
- [40] 刘波, 马柱国, 丁裕国. 中国北方近45年蒸发变化的特征及与环境的关系[J]. 高原气象, 2006, **25**(5): 840-848.
- [41] Pang Z H, Kong Y L, Froehlich K, *et al.* Processes affecting isotopes in precipitation of an arid region[J]. *Tellus B*, 2011, **63**(3): 352-359.
- [42] 林纾, 王毅荣. 中国黄土高原地区降水时空演变[J]. 中国沙漠, 2007, **27**(3): 502-508.
- [43] 张调风, 张勃, 张苗, 等. 1962—2010年甘肃省黄土高原区干旱时空动态格局[J]. 生态学杂志, 2012, **31**(8): 2066-2074.
- [44] 李亚举, 张明军, 王圣杰, 等. 我国大气降水中稳定同位素研究进展[J]. 冰川冻土, 2011, **33**(3): 624-633.

关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明。

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为。自即日起,我们各刊在接受作者投稿时,要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果,文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊。

2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前,所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊。

我们将认真对待作者所作的上述承诺,并建立信息共享机制,对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动。

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任。我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法,并积极宣传和配合。

《环境科学》编辑部

《中国环境科学》编辑部

《环境科学学报》编辑部

《Journal of Environmental Sciences》编辑部

CONTENTS

Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>	(1141)
Regional Source Apportionment of PM _{2.5} in Beijing in January 2013	LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>	(1148)
Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(1154)
Soluble of Metals within TSP in Shanghai	CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>	(1164)
Analysis of Component Spectral Characteristics of PM ₁₀ -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen	ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>	(1173)
Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes	WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>	(1182)
Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014	BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(1187)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM _{2.5-10} in Mountain Background Region of East China in Spring	SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>	(1195)
Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves	YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>	(1202)
Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province	HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>	(1208)
Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen	YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>	(1217)
Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes	SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>	(1227)
Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards	ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1234)
Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen	JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i>	(1241)
Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport	ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long	(1249)
Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary	WANG Miao-miao, SUN Zhi-gao, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>	(1256)
Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>	(1263)
Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event	REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>	(1270)
Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources	ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai	(1277)
Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period	LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>	(1285)
Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary	CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>	(1293)
Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake	WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>	(1301)
Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond	YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>	(1309)
Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer	LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>	(1317)
Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study	ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>	(1326)
Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using γ Irradiation	ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>	(1332)
Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony	CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>	(1338)
Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation	SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>	(1345)
Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol	KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>	(1352)
Photolysis of Gaseous HNO ₃ on the α -Fe ₂ O ₃ Films Under 308 nm UV Light	LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>	(1359)
Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode	HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>	(1365)
Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis	XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>	(1374)
Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i>	MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>	(1379)
Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water	LI Jing, LI Wen-ying	(1385)
Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process	LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>	(1392)
Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitritation System	ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>	(1399)
Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>	(1406)
Effects of Total Nitrogen and BOD ₅ /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor	YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>	(1412)
Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinfo Mountain, Chongqing	SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>	(1417)
Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province	ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1425)
Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain	SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil	WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>	(1437)
Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions	DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1445)
Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County	QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>	(1453)
Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure	WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>	(1461)
Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead	CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>	(1468)
Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling	XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>	(1474)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content	GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>	(1481)
A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area	CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>	(1489)
Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase	WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>	(1497)
Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs	WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>	(1507)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 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