

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第10期

Vol.34 No.10

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京地区大气气溶胶 PM _{2.5} 中稳定碳同位素组成研究	吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 孙德玲, 卢霞, 姜文娟 (3727)
太原市空气颗粒物中正构烷烃分布特征及来源解析	胡冬梅, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 韩峰, 刘效峰, 冀豪栋, 张鹏九 (3733)
交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究	罗娜娜, 赵文吉, 晏星, 官兆宁, 熊秋林 (3741)
公交车燃用生物柴油的颗粒物排放特性	楼狄明, 陈峰, 胡志远, 谭丕强, 胡炜 (3749)
兰州及其周边区域大气降水 δ ¹⁸ O 特征及其水汽来源	陈粉丽, 张明军, 马潜, 李小飞, 王圣杰, 李菲 (3755)
天山乌鲁木齐河源 1 号冰川区气溶胶水溶性离子变化特征及来源分析	岳晓英, 李忠勤, 张明军, 周平, 樊晋 (3764)
O ₃ /H ₂ O ₂ 氧化苯乙烯气体性能及机制	何觉聪, 黄倩茹, 叶杞宏, 罗雨薇, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (3772)
马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪	关晖, 肖化云, 朱仁果, 郑能建, 瞿玲露 (3777)
江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究	李男, 肖化云, 陈永忠, 周丹, 罗笠, 吴代敏 (3782)
辽河流域非点源污染空间特征遥感解析	王雪蕾, 蔡明勇, 钟部卿, 姚延娟, 殷守敬, 吴迪 (3788)
景观带尺度高寒区水文特征时空变化规律研究	杨永刚, 胡晋飞, 肖洪浪, 邹松兵, 尹振良 (3797)
金普湾海域表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	游丽丽, 宗海波, 张淑芳, 尹国宇, 李涛, 侯立军 (3804)
崇明东滩湿地干湿交替过程脲酶活性变化初探	韩建刚, 曹雪 (3810)
FDA 水解酶分析法表征近海泥滩微生物活性	刘叶, 邹立, 刘陆, 高冬梅 (3818)
中国东北主要河流沉积物中多溴二苯醚的含量状况及生态风险分析	袁海峰, 成杭新, 赵传冬, 刘应汉, 杨柯, 李括, 彭敏, 刘飞 (3825)
深圳大鹏湾海域表层沉积物和生物体中多环芳烃残留及其风险评价	孙闰霞, 柯常亮, 谷阳光, 卢腾腾, 杜飞雁, 马胜伟, 林钦 (3832)
PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源	边璐, 李田, 侯娟 (3840)
三峡库区蓄水初期大宁河重金属食物链放大特征研究	余杨, 王雨春, 周怀东, 高博, 赵高峰 (3847)
小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究	李飞鹏, 张海平, 陈玲 (3854)
太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟	韩涛, 翟淑华, 胡维平, 张红举, 李钦钦 (3862)
湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究	陈超, 钟继承, 范成新, 孔明, 余居华 (3872)
水体/底泥生物基城市河道富营养化水体修复试验研究	周慧华, 宋晓光, 吴革, 谢鑫源 (3879)
底泥调控剂对感潮河涌沉积物中重金属的影响	区凤荏, 孙国萍, 许玫英 (3888)
区域水化学条件对淮南采煤沉陷区水域沉积物磷吸附特征的影响研究	易齐涛, 孙鹏飞, 谢凯, 曲喜杰, 王婷婷 (3894)
4 种人工湿地填料的 f2 噬菌体吸附特性	陈迪, 郑祥, 魏源送, 杨勇 (3904)
稻壳灰对抗生素磺胺的吸附特性研究	纪莹雪, 王凤贺, 张帆, 张艳红, 王国祥, 顾中铸 (3912)
紫外辐射对腐殖酸化学稳定性影响机制研究	王文东, 周礼川, 丁真真, 王洪平, 孙学军 (3921)
基于石墨烯载体的铁基材料制备及除砷性能比较	朝木尔乐格, 冯流, 霍艳霞 (3927)
nTiO ₂ 在水中的分散沉降行为研究	陈金媛, 方金凤, 魏秀珍 (3933)
微生物-铁氧化物交互作用对黄土中砷活化迁移的影响	谢芸芸, 陈天虎, 周跃飞, 谢巧勤 (3940)
两性离子在聚偏氟乙烯 (PVDF) 膜表面接枝改性的研究	周桂花, 肖峰, 肖萍, 王东升, 段晋明, 石健, 臧莉 (3945)
化粪池排口处土壤对典型农户生活污水氮素污染物的消减测算研究	周锋, 王文林, 王国祥, 马久远, 万寅婧, 唐晓燕, 梁斌, 季斌 (3954)
珠江三角洲典型集约化猪场废水污染特征及风险评价	李文英, 彭智平, 于俊红, 黄继川, 徐培智, 杨少海 (3963)
污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响	金树权, 周金波, 陈若霞, 林斌, 王德耀 (3969)
活性污泥絮体粒径分布与分形维数的影响因素	李振亮, 张代钧, 卢培利, 曾善文, 杨永浩 (3975)
不同恢复方式对硝化颗粒污泥活性的影响	郭秀丽, 高大文, 卢健聪 (3981)
生物陶粒反应器的氨自养反硝化研究	陈丹, 王弘宇, 宋敏, 杨开, 刘晨 (3986)
亚高山草甸土壤呼吸的空间异质性研究	严俊霞, 李君剑, 李洪建, 张义辉 (3992)
SiB3 模式对作物区 CO ₂ 通量的模拟研究	张庚军, 卢立新, 蒋玲梅, 蒋磊, Ian Baker (4000)
缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响	徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 祝滔 (4009)
典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例	闫慧, 陈杰, 肖军 (4017)
苏州、无锡和南通道路灰尘中的多溴联苯醚和多氯联苯	史双昕, 董亮, 李玲玲, 张辉, 李斯明, 张天野, 黄业茹 (4024)
废旧汽车拆解区土壤中多环芳烃垂向分布特性	吴彦瑜, 胡小英, 洪鸿加, 彭晓春 (4031)
铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究	王旌, 罗启仕, 张长波, 谈亮, 李旭 (4036)
典型磺胺类抗生素在土柱中的淋溶规律研究	李曼, 陈卫平, 魏福祥, 焦文涛 (4042)
3 种金属氧化物纳米材料在不同土壤中迁移行为研究	方婧, 余博阳 (4050)
多孔介质中 NAPLs 流体毛细管指进形态及分形表征	李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4058)
毛竹入侵对常绿阔叶林主要树种的化感作用研究	白尚斌, 周国模, 王懿祥, 梁倩倩, 陈娟, 程艳艳, 沈蕊 (4066)
珠江口典型水产养殖区抗生素抗性基因污染的初步研究	梁惜梅, 袁湘平, 施震 (4073)
江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价	刘洋, 付强, 高军, 徐网谷, 殷波, 曹亚乔, 秦卫华 (4081)
铜胁迫对不同基因型谷子幼苗基因组 DNA 多态性的影响	张义贤, 付亚萍, 肖志华, 张喜文, 李萍 (4090)
利用高通量测序对封存 CO ₂ 泄漏情景下土壤细菌的研究	田地, 马欣, 李玉娥, 查良松, 伍洋, 邹晓霞, 刘爽 (4096)
酸性矿山废水区域废矿石中真核生物多样性分析	李思远, 郝春博, 王丽华, 吕铮, 张丽娜, 刘莹, 冯传平 (4105)
十溴联苯醚降解菌的特性及功能蛋白初步分析	常晶晶, 尹华, 秦华明, 叶锦韶, 彭辉, 宋小飞 (4112)
硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响	胡堂, 黄益宗, 黄艳超, 刘云霞, 梁建宏 (4119)
外源铁对不同番茄品种生理特性、镉积累及化学形态的影响	刘俊, 周坤, 徐卫红, 陈惠, 张明中, 江玲, 杨芸, 王崇力, 熊治庭 (4126)
电子废物排放持久性有毒污染物的控制政策分析	李力, 吕永龙, 王铁宇 (4132)
《环境科学》征稿简则 (3926) 《环境科学》征订启事 (4057) 信息 (3878, 3953, 3999, 4041)	

兰州及其周边区域大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 特征及其水汽来源

陈粉丽, 张明军*, 马潜, 李小飞, 王圣杰, 李菲

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要: 根据2011年4月~2012年3月在兰州及其周边区域永登、皋兰和榆中这4个站点所采集到的243个大气降水样品及同期相关气象资料, 对兰州及其周边区域大气降水中稳定同位素的时空变化特征及其环境效应进行了分析, 通过回归分析建立了大气降水线方程, 同时采用HYSPLIT 4.9模型对兰州及其周边区域水汽来源进行了追踪, 并建立水汽输送模式。结果表明, 兰州及其周边区域的大气降水线方程为 $\delta\text{D} = 7.48 \delta^{18}\text{O} + 8.13$, 表明该区局地蒸发较强烈; 在时间变化上, 降水中同位素值表现为冬低夏高, 而 $d\text{-excess}$ 值变化趋势较为平稳, 但不同时段下, 也存在着一定的变化; 从空间分布来看, 由西至东加权平均 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈减小趋势; 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度呈正相关关系, 而与降水量表现为负相关; 在大尺度下, 西风水汽、局地水汽以及东南季风水汽均对兰州及其周边区域有一定的影响, 其中西风水汽占主导作用, 而东南季风水汽的影响在时间上有一定的局限性, 主要集中在6月初至8月初这一时段。

关键词: 兰州及其周边区域; 稳定同位素; 大气降水; 同位素效应; 水汽来源

中图分类号: X131.1; X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)10-3755-09

Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Water Vapor Sources in Lanzhou City and Its Surrounding Area

CHEN Fen-li, ZHANG Ming-jun, MA Qian, LI Xiao-fei, WANG Sheng-jie, LI Fei

(College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Based on the 243 daily precipitation samples and meteorological statistics at the four stations at Lanzhou city and its surrounding area (Yongdeng, Gaolan and Yuzhong) from April 2011 to March 2012, the characteristics of stable isotopes in precipitation, as well as the correlation between stable isotopes and meteorological records, were analyzed. The precipitation equation of Lanzhou city and its surrounding area were calculated through the regression analysis, and the water vapor source of the four sites was tracked by the HYSPLIT 4.9 model, and water vapor transmission regime was established. Results showed that the precipitation equation of $\delta\text{D} = 7.48 \delta^{18}\text{O} + 8.13$ indicated intense evaporation; $\delta^{18}\text{O}$ value was low in winter but high in summer; The variations of observed $d\text{-excess}$ was stable all over the year, but there was variation in different time periods; The spatial distribution showed that the weighted $\delta^{18}\text{O}$ value decreased from the west to the east; The linear relationships between $\delta^{18}\text{O}$ and temperature was positive correlation, but the linear relationships between $\delta^{18}\text{O}$ and precipitation was negative correlation; The seasonal variations of $\delta^{18}\text{O}$ indicated that westerly water vapor, local moisture and summer monsoon all had influence on this region in a large scale, but the westerly water vapor played a dominant role. However, the impact of monsoon moisture had a seasonal limitation, mainly during the period from June to early August.

Key words: Lanzhou City and its surrounding area; stable isotopes; precipitation; isotope effects; water vapor source

氢氧稳定同位素作为研究水循环的示踪元素, 不仅在不同的水体中存在差异, 并且依赖于温度、降水量、经度和纬度等因子^[1~4], 因而通过观测其丰度的变化引导人们深入认识地球化学和水循环过程^[4]。降水是水循环过程中的一个重要环节, 降水中稳定同位素的组成取决于水汽的输送过程以及水汽源区的初始状态^[4], 因此降水中所蕴含的 ^{18}O 和 ^2H 这两种天然的示踪剂对于追踪水汽来源的变化有较强的指示意义^[5]。

我国在大气降水稳定同位素研究方面成果较多, 针对局地乃至大尺度大空间^[6~17]的降水稳定同位素分布特征、同位素效应、水汽输送过程、变化规律与机制等已取得了一系列重要的认识。张明军

等^[18]利用GNIP所提供的数据研究了兰州市大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 及其相关要素的变化特征以及夏季(7~9月)的水汽来源; 黄天明等^[19]和章新平等^[20]也分别利用GNIP兰州站资料, 对该区大气降水同位素特征进行了相关研究。然而, 关于兰州及其周边区域大气降水中稳定同位素组成、时空分布规律以及水汽输送过程、变化规律和机制的研究不够深入; 同时, 由于这一区域处于季风区与非季风区的边缘

收稿日期: 2013-01-17; 修订日期: 2013-04-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41161012, 41240001); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0019); 甘肃省高等学校基本科研业务费项目

作者简介: 陈粉丽(1978~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为同位素地球化学, E-mail: chenfenli1102@163.com

* 通讯联系人, E-mail: mjzhang2004@163.com

区,自然地理状况和气候条件较为复杂和独特,降水水汽源地也还不清楚;基于此本研究利用兰州及其周边区域永登、皋兰和榆中这4个观测站收集到的降水样品及相关气象要素,建立了该区大气降水线方程,对降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的时空变化特征及其环境效应进行了分析,并重点讨论了该区大气降水水汽来源,以为深入讨论兰州及其周边区域水文循环过程和机制提供依据。

1 研究区概况

兰州及其周边区域处于黄土高原、蒙新高原和青藏高原的接壤地带,由于本研究区独特的地理位置,使得该区域内的水循环机制较为复杂。本研究在黄土高原西部边缘区选择了永登(36.73°N , 103.27°E)、兰州(36.07°N , 103.82°E)、皋兰(36.33°N , 103.95°E)和榆中(35.85°N , 104.12°E)这4个站点进行大气降水样品的采集(图1)。从地势上看,西部、南部高,东北低,境内大部分地区为海拔1450~2500 m的丘陵和盆地;气候上具有明显的季节性的冷暖交替和干湿交替;年平均降水量360 mm,主要集中在6~9月,年均温 9.3°C ,属温带大陆性气候^[21]。从地形上看,4个站点由北向南分布较为均匀。其中,永登、皋兰、兰州这3个站点位于黄河以北(兰州站紧邻黄河),榆中站位于黄河以南。

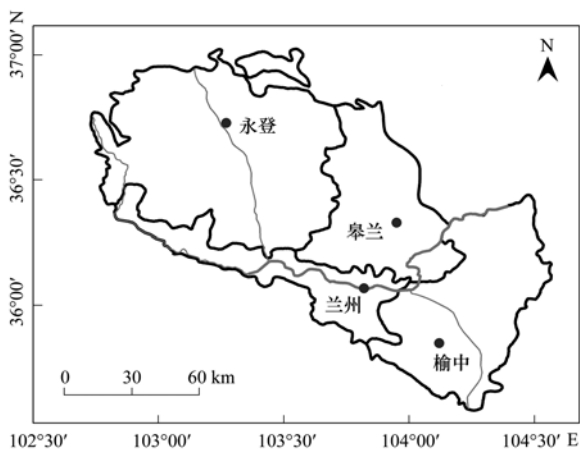


图1 研究区概况与观测点位置分布示意

Fig. 1 Locations of study area and sampling stations in Lanzhou City and its surrounding area

2 样品采集及数据分析

永登、皋兰和榆中这3个站点的样品依托兰州市气象局进行采样,分别在上述3个国家级气象台站观测场内进行,兰州站的样品采集是在西北师范

大学的气象园进行。为了防止雨水的蒸发,笔者在降雨筒内部安置了一个漏斗,漏斗口处用乒乓球将其封盖,待降雨结束后,立即对雨水样品进行收集,以最大程度地减低由于蒸发现象的存在所造成的数据误差。

采集过程中,若降水为液态则直接将收集好的降水装入塑料水样瓶,盖紧瓶盖,并用胶带将瓶口密封;若为固态(雪),则首先将样品装入洁净的塑料袋内,扎紧袋口,待其在室温下完全融化后装入水样瓶密封,同时记录样品的起始时刻、结束时刻、起始温度、结束温度、降水量、起始湿度、结束湿度、起始气压和结束气压等相关气象指标,所有收集到的样品均低温保存于冰柜。

永登、兰州、榆中站的采样时段为2011年4月~2012年3月,皋兰站的采样时段2011年5~9月。观测期间,共采集到243个降水样品,其中永登、兰州、皋兰、榆中站分别为86、54、25和78个。所有样品均在西北师范大学地理与环境科学学院利用液态水同位素分析仪(LGR, DLT-100)进行测定,在分析之前,首先将样品取出,待其在室温下融化,之后进行分析^[22]。同位素值的计算公式如下:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = [(R_{\text{样品}}/R_{\text{SMOW}}) - 1] \times 1000 \quad (1)$$

式中, $R_{\text{样品}}$ 为降水样中 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比值, R_{SMOW} 为SMOW中 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比值, δD 值的测试误差不超过(1‰, $\delta^{18}\text{O}$ 值的测试误差不超过0.2‰^[22]。

降水中氢氧稳定同位素的加权平均值为:

$$\delta_{(w)} = \sum P_i \delta_i / \sum P_i \quad (2)$$

式中, $\delta_{(w)}$ 为加权平均值, P_i 为降水量, δ_i 为其相应的同位素值。

3 结果与分析

3.1 大气降水线

在全球尺度下,大气降水中 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的关系——全球大气降水线(global meteoric water line, GMWL)的关系表现为:

$$\delta\text{D} = 8.0 \delta^{18}\text{O} + 10.0 \quad (3)$$

大气水线的斜率反映两类稳定同位素D和 ^{18}O 分馏速率的对比关系,常数项指示氘对平衡状态的偏离程度^[23]。因此,大气水线对于研究水循环过程中稳定同位素的变化具有重要意义。

由于影响因素的不同,各局地大气水线(local meteoric water line, LMWL)也不同。结合兰州及其周边区域4个站点大气降水同位素数据,得出该区

的局地大气水线方程为:

$$\delta\text{D} = 7.48 \delta^{18}\text{O} + 8.13 \quad (4)$$

通过和全球大气水线方程(图2)进行对比发现,兰州及其周边区域大气水线方程的斜率和截距均小于全球大气水线方程,表明了该区较为干燥的气候和较强蒸发现象的存在^[24]. 而通过和西北地区的大气水线方程^[25] ($\delta\text{D} = 7.8 \delta^{18}\text{O} + 9.4$) 进行对比后发现,兰州及其周边区域局地水线方程的斜率和截距与西北地区的较为接近. 由图2可知,该区大气降水线斜率略小于全球水线,造成这种差异的原因可能是由于凝结物在未饱和大气中降落时,受

到非平衡蒸发的影响. 由于该区气候干燥,加之空气湿度低,雨水在降落过程中,可能经历了一定程度的二次蒸发,导致重同位素在雨水中大量富集,并致使斜率减小,而截距值也随着斜率的减小而逐渐降低.

兰州及其周边区域各站点降水氢氧同位素线性关系为:

$$\delta\text{D} = 7.01 \delta^{18}\text{O} + 4.95 \quad (5)$$

$$(\text{永登}, R^2 = 0.94, n = 86)$$

$$\delta\text{D} = 7.48 \delta^{18}\text{O} + 4.62 \quad (6)$$

$$(\text{兰州}, R^2 = 0.96, n = 54)$$

$$\delta\text{D} = 7.63 \delta^{18}\text{O} + 20.17 \quad (7)$$

$$(\text{皋兰}, R^2 = 0.92, n = 25)$$

$$\delta\text{D} = 7.80 \delta^{18}\text{O} + 11.37 \quad (8)$$

$$(\text{榆中}, R^2 = 0.98, n = 78)$$

如图3所示,兰州及其周边区域4个站点的大气水线方程差异明显,大气水线方程斜率以永登站(7.01)最低,可能该区气候干燥,加之空气湿度低致使二次蒸发较强;兰州站(7.48)次之,可能兰州表现出一定的热岛效应,温度稍高于周边区域所致;皋兰站(7.63)和兰州站(7.48)的斜率较接近于黄土高原西部边缘区的斜率(7.51),而榆中站(7.80)较大,与全球大气水线斜率最为接近,可能是因为兴

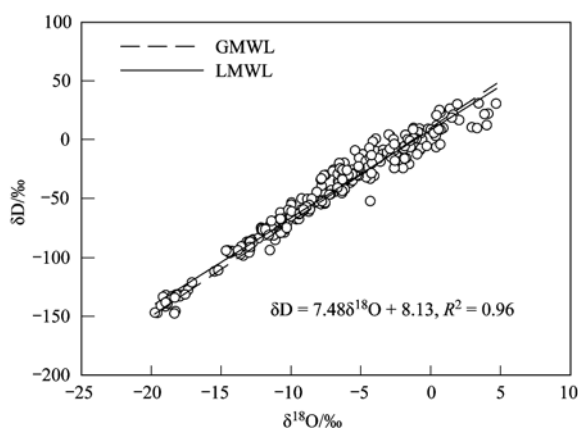


图2 兰州及其周边区域大气水线方程

Fig. 2 LMWL in Lanzhou City and its surrounding area

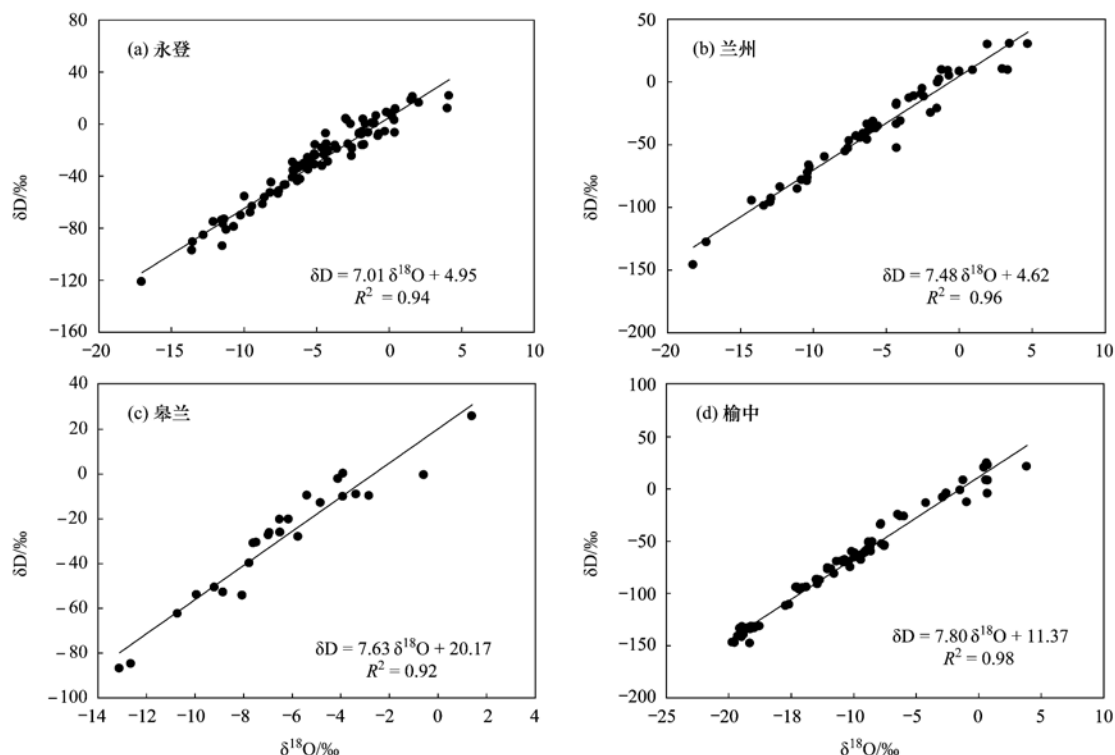


图3 兰州及其周边区域4个站点大气降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 相关散布

Fig. 3 Correlated scatters between δD and $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation at the four stations in Lanzhou City and its surrounding area

隆山位于榆中,兴隆山森林植被茂盛,相比其它站点,空气湿度相对较大的原因.各站点大气水线一定程度上反映了该区大气降水不同的同位素过程和复杂的自然地理状况以及气候条件.

3.2 大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的时空分布

3.2.1 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 随时间的变化

$\delta^{18}\text{O}$ 的变化趋势可以大致地反映不同站点之间所受的水汽来源及气候条件的差异^[24].对兰州及其周边区域4个站点降水同位素进行统计分析后发现,永登站的 $\delta^{18}\text{O}$ 介于 $-17.0\text{‰} \sim 4.1\text{‰}$ 之间,平均值为 -4.9‰ ;兰州站全年的 $\delta^{18}\text{O}$ 值最小值为 -18.2‰ ,最大值 4.7‰ ,平均值为 -5.7‰ ;榆中站降水同位素值变化范围为 $-19.7\text{‰} \sim 3.9\text{‰}$,平均值为 -10.8‰ ;由于皋兰站仅采集了2011年5~9月的数据,其 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化幅度略小于以上3站,最小值为 -13.1‰ ,最大值为 1.4‰ ,平均值为 -6.7‰ .综合分析4站降水同位素分布情况不难发现,其 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化范围具有一定的相似性,表明其可能是受到了大尺度上相同水汽来源的影响.

从全年尺度来看, $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化明显具有夏高冬低的规律,而这可能是中高纬度地区受温度效应影响的结果^[4].降水同位素 δ 值5~9月较高,10月以后 $\delta^{18}\text{O}$ 值逐渐降低.由图4可知,6月初至7月初, $\delta^{18}\text{O}$ 表现出下降的态势, $\delta^{18}\text{O}$ 值最低达到 -11.7‰ ,结合亚洲夏季风的进退时间,即始于5月,撤退于9月底、10月初的事实^[26],并根据 $\delta^{18}\text{O}$ 推

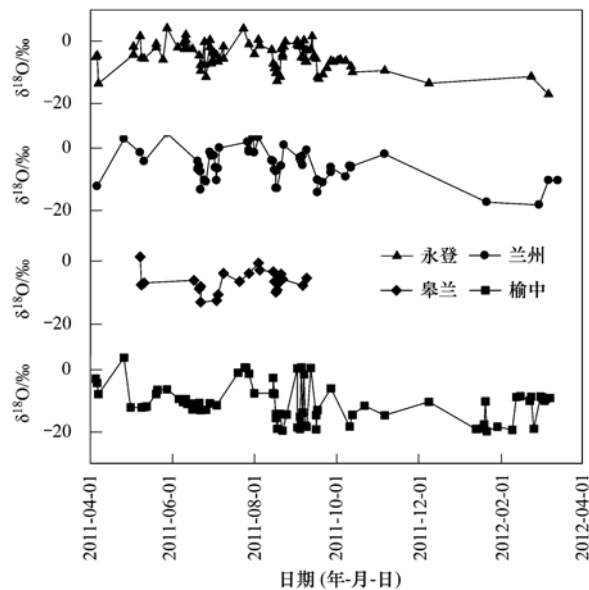


图4 兰州及其周边区域 $\delta^{18}\text{O}$ 值的季节变化

Fig. 4 Seasonal variations of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation of Lanzhou City and its surrounding area

断,在这一时段,兰州及其周边区域可能存在远距离水汽的影响,而该水汽可能主要通过季风作用输送.在这一期间, $\delta^{18}\text{O}$ 值的降低可能是受“大陆效应”的影响,即水汽中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值随着气团的运行而不断贫化的作用下不断减小.而从7月初至8月中旬, $\delta^{18}\text{O}$ 变化模式明显发生变化, $\delta^{18}\text{O}$ 值突然升高.而在8月中旬至11月期间, $\delta^{18}\text{O}$ 变化则稍显平稳,在12月以后, $\delta^{18}\text{O}$ 值开始呈现大幅度的降低,这有可能是温度效应作用的结果.

图5为兰州及其周边区域 d -excess值的日平均值变化趋势,从全年尺度来看, d -excess值变化趋势较为平稳,平均值为 11.6‰ ,表明研究区域在全年尺度下应该受到较为固定的水汽源区的影响,这股水汽可能主要来自西风带的输送.进一步分析发现,不同时段下,影响兰州及其周边区域的水汽也存在一定的变化,该变化在6月初至8月中旬最为明显.由图5可知,在6月初至7月初, d -excess值表现出下降的态势, d -excess值最低为 -4.6‰ .结合亚洲夏季风的进退时间,并根据 $\delta^{18}\text{O}$ 、 d -excess值同时降低的变化趋势进行综合判断后不难推断,在这一时段,兰州及其周边区域可能存在远距离水汽的影响,而该水汽可能主要通过季风作用输送,在这一期间, d -excess值的降低可能是因为随着季风作用的加强,水汽源区的相对湿度不断增高,因而导致了过量氘值的降低.而从7月初至8月中旬, d -excess值仍然表现为下降,且下降的幅度明显低于前一个时段,最低值达到 -20.6‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 值的升高以

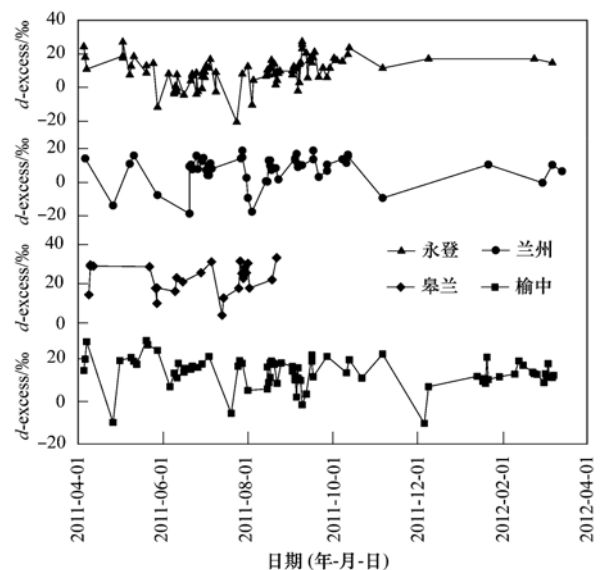


图5 兰州及其周边区域降水中 d -excess值的季节变化

Fig. 5 Seasonal variations of d -excess in precipitation of Lanzhou City and its surrounding area

及 $d\text{-excess}$ 值的降低可以说明在这一时段下该地区可能存在着较为强烈的二次蒸发作用,但从 $d\text{-excess}$ 值的整体变化趋势上看,这一时段内, $d\text{-excess}$ 值的过量降低也可能表明季风水汽的不断影响. 而在 8 月中旬至 11 月期间, $d\text{-excess}$ 值的变化则稍显平稳. 在 12 月以后, $\delta^{18}\text{O}$ 值开始呈现大幅度的降低,而 $d\text{-excess}$ 值却不断升高,表明大量局地蒸发的水汽夹杂在西风气团中对兰州地区产生影响.

3.2.2 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 随空间的变化

根据公式(2)计算得出该区同位素观测点降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的加权平均值,并在 ArcGIS 软件中采用样条函数法对其进行空间插值分析,可以得到兰州及其周边区域大气降水加权平均 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间分布情况(图 6). 为使得插值结果更加科学合理,计算中还增添了该区周边同时期的 6 个观测点,即 GNIP 观测网络中的银川、成都、张掖以及长武^[14]、南郑^[27]、西宁^[28]作为辅助. 通过逐一剔除观测点的数据,利用其它站点数据模拟生成该点的预测值,将其与实测值进行比较,以分析插值的误差情况,验证结果表明,该方法可以较好地反映出兰州及其周边区域降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间分布特征.

通过图 6 可以看出,加权平均 $\delta^{18}\text{O}$ 值在由西向东的方向上逐渐降低,结合水汽源区的影响可以分析,兰州及其周边区域在大尺度下可能较多地受到了西风带水汽的影响,由于西风水汽的作用,永登站的 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对最高,而随着水汽的继续运行,氧同位素值逐渐降低,在榆中站达到最低点,而兰州和皋兰两站的值介于二者之间.

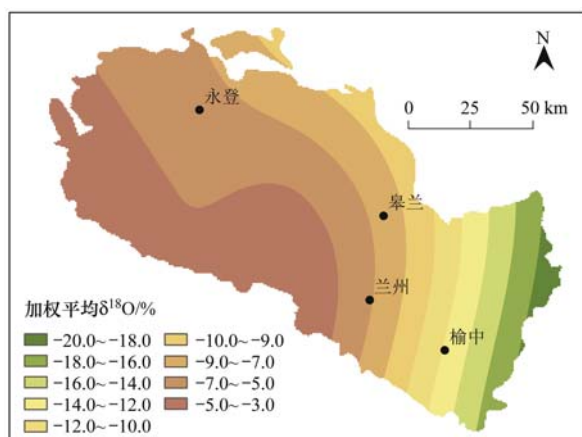


图 6 兰州及其周边区域大气降水中加权平均 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间分布

Fig. 6 Spatial variations of the weighted $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation of Lanzhou City and its surrounding area

3.3 大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的环境效应

3.3.1 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的相关关系

1964 年 Dansgaard^[4]依据当时在大西洋和北极的观测资料,提出了影响降水中稳定同位素的主要因素有:水汽源的情况、温度效应、降水量效应、大陆效应、高度效应和纬度效应等. 然而,在影响降水稳定同位素组成的诸多要素中,温度被认为是与之关系最密切的^[29]. 温度效应的产生是因为大气和大气降水中稳定同位素的分馏主要受制于相变过程中的温度^[4,30]. 因此,可以利用稳定同位素比率/温度之间的简单线性关系对中高纬度不同沉积物中蕴含的气候信息进行合理的解释和定量的恢复^[31]. 通过对永登、兰州、皋兰、榆中降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度之间的回归分析,获得直线方程分别为:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = 0.43T - 10.04 \quad (9)$$

(永登, $R^2 = 0.33, n = 86, P < 0.01$)

$$\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = 0.35T - 10.98 \quad (10)$$

(兰州, $R^2 = 0.10, n = 54, P < 0.05$)

$$\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = 0.18T - 9.81 \quad (11)$$

(皋兰, $R^2 = 0.06, n = 25, P = 0.24$)

$$\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = 0.15T - 12.02 \quad (12)$$

(榆中, $R^2 = 0.05, n = 78, P < 0.05$)

图 7 表示兰州及其周边区域永登、皋兰和榆中 $\delta^{18}\text{O}$ 与取样温度的相关散布. 可以看出,兰州及其周边区域 4 个观测站与温度均呈正相关关系,最高相关系数可达 0.43(永登). 即随着温度的升高, $\delta^{18}\text{O}$ 逐渐增大. 这一现象符合经典同位素理论:温度效应主要发生在中高纬度大陆内部地区, $\delta^{18}\text{O}$ 受温度影响较大^[32]. 这与章新平等^[20]利用 GNIP 兰州站降水同位素资料分析结论较为一致, $\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = 0.3265T - 11.429, R = 0.5815, n = 32$, 本研究兰州站实测资料 $\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = 0.35T - 10.98, R^2 = 0.10, n = 54$.

3.3.2 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量的相关关系

高纬度地区影响降水中稳定同位素比率的主要是温度,低纬度热带地区是降水量,中纬度地区温度和降水量均影响同位素比率的变化. 在中低纬度海洋或季风区,尤其在亚洲季风区,降水中稳定同位素具有显著的降水量效应,即降水中稳定同位素比率与降水量之间存在明显的负相关关系. Yapp^[29]利用数学方法对降水量效应产生的可能原因进行了模拟,指出在对流云中,对流越强,云中被凝结的水汽越多,降水量越大,因此,由冲刷作用(rainout)引起的降水中稳定同位素的贫化越强,反之亦然.

对兰州及其周边区域 4 个观测站降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量进行回归,获得直线方程分别为:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = -0.17P - 4.26 \quad (13)$$

(永登, $R^2 = 0.05$, $n = 86$, $P < 0.05$)

$$\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = -0.35P - 3.85 \quad (14)$$

(兰州, $R^2 = 0.11$, $n = 54$, $P < 0.05$)

$$\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = -0.47P - 5.33 \quad (15)$$

(皋兰, $R^2 = 0.21$, $n = 25$, $P < 0.05$)

$$\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = -0.24P - 10.02 \quad (16)$$

(榆中, $R^2 = 0.04$, $n = 78$, $P = 0.08$)

研究表明,降水量效应的产生与强烈的对流现象相联系,在降水量效应显著的地区,降水中稳定同位素比率的大小在一定程度上可以指示季风的强度. 图8为永登、兰州、皋兰和榆中这4个站点在全年尺度下 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量 P 之间的散点分布图,由拟合所得线性回归方程可知,在全年尺度下, $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量之间均呈现负相关.

Araguás-Araguás 等^[33]分析指出,亚洲季风区降水中稳定同位素比率变化的特征与发生在对流云中稳定同位素的被冲刷程度、降水强度、水汽再循环以及雨滴在云下与周围大气中稳定同位素成分的物质交换有密切关系. 上述研究表明,季风区降水中稳定同位素比率的变化与大气环流特征以及大气中的水汽含量存在密切联系. 可以推测兰州及其周边区域受到季风气候的影响,降水的水汽来源以及影

响降水的因素非常复杂.

3.4 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 反映的水汽来源

笔者应用 HYSPLIT 4.9 模型,并结合美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心所提供的2011~2012年全球再分析资料,对兰州及其周边区域2011年4月~2012年3月的水汽来源轨迹进行了模拟. 根据4个站点在降水发生时间上的一致性,选择2011年的4个研究时段,即4月1~10日、7月20日~8月5日、9月2~20日、10月~次年3月,作为研究时段,计算了不同时段下每日00:00、06:00、12:00与18:00(协调世界时)的水汽来源轨迹,然后对各时段内的所有计算结果进行了聚类平均,回朔时间为10 d,计算的结果如图9所示.

图9表明,兰州及其周边区域的大气降水水汽来源变化存在明显的阶段性,但从全年尺度来看,影响兰州及其周边区域的水汽依然是来源于大西洋并通过西风带输送的水汽,且该气团大多是经由我国新疆,沿着河西走廊地区向东输送. 春季,该区主要存在两条水汽来源路径[图9(a)],源自西风带输送的水汽和北面方向地区发源水汽的影响;夏季(6~8月),该区除了受到西风水汽的影响以外,还会受到东南方向来源水汽的影响,且存在不同的输送路径[图9(b)]. 图9(c)为8月中

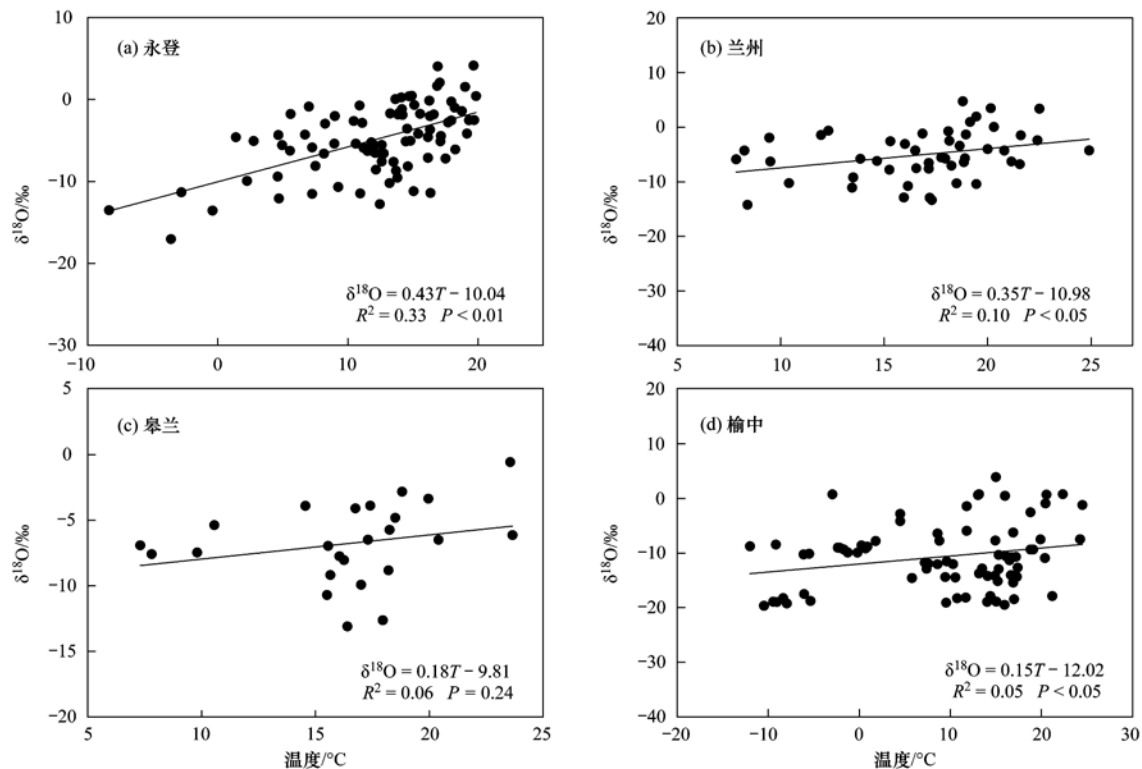


图7 兰州及其周边区域 $\delta^{18}\text{O}$ 值与温度的相关关系

Fig. 7 Correlations between $\delta^{18}\text{O}$ and temperature in Lanzhou City and its surrounding area

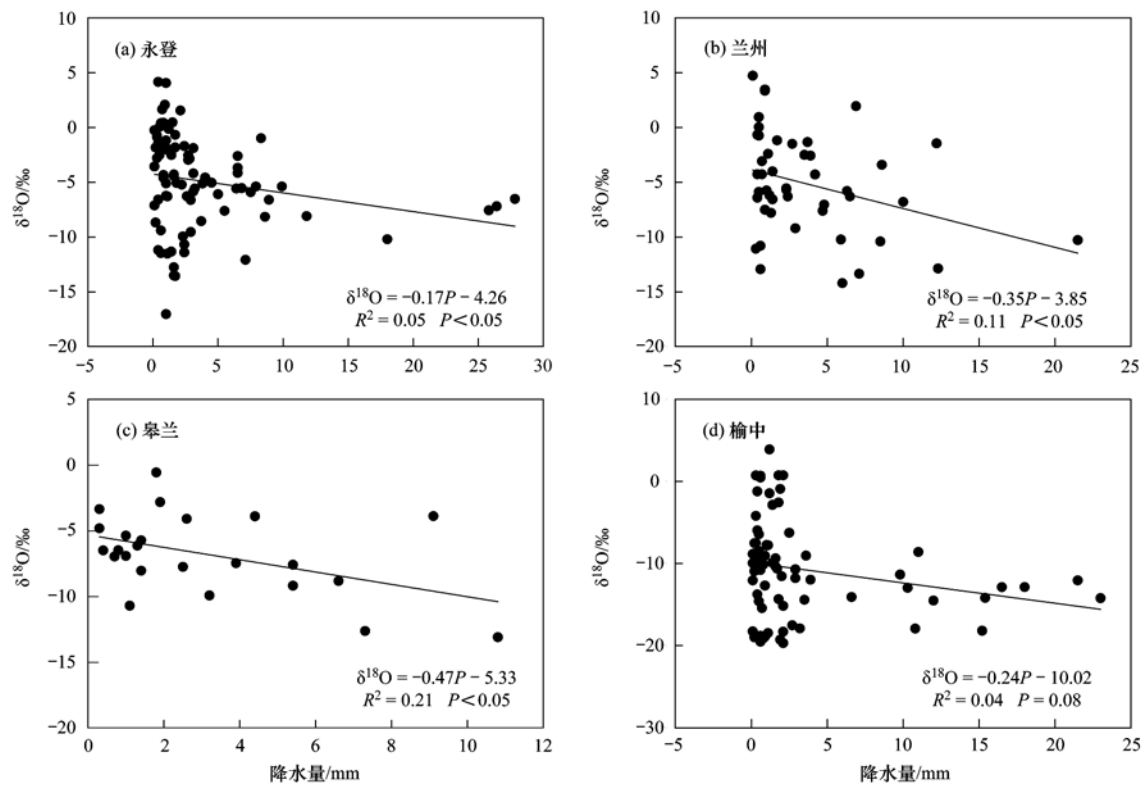


图 8 兰州及其周边区域 $\delta^{18}\text{O}$ 值与降水量的相关关系

Fig. 8 Correlations between $\delta^{18}\text{O}$ and precipitation in Lanzhou City and its surrounding area

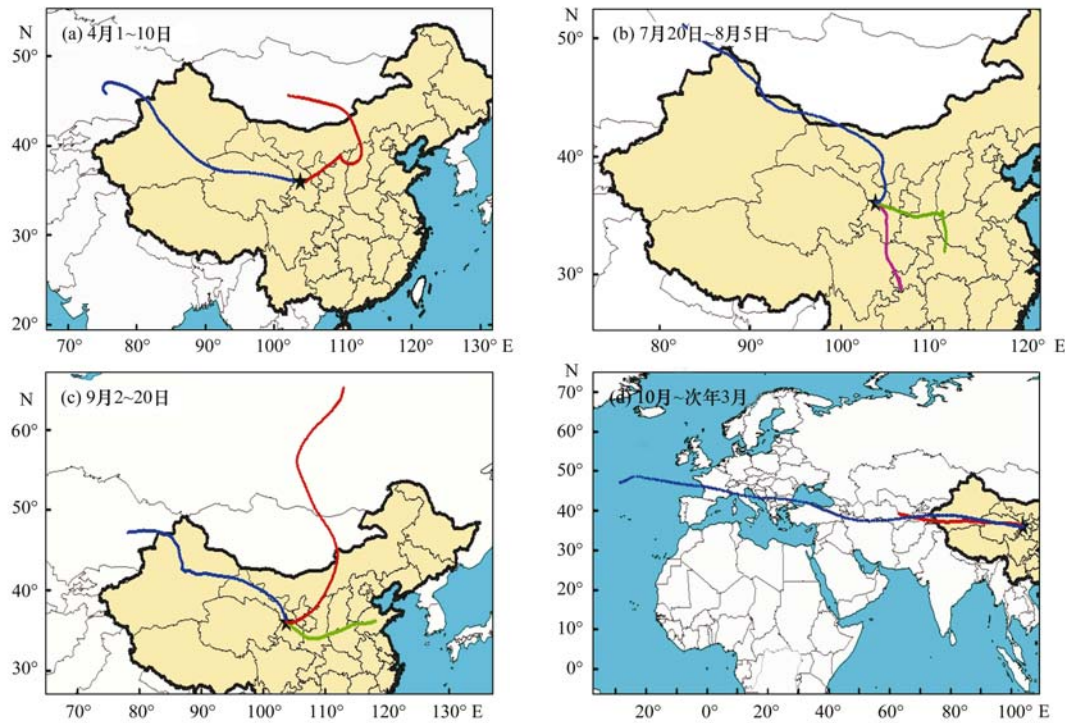


图 9 兰州及其周边区域气流后向轨迹聚类图

Fig. 9 Backward trajectories cluster of moisture in Lanzhou City and its surrounding area

旬以后直至 10 月中旬该区降水水汽来源轨迹模拟示意,表明该区仍然有来自东南方向的水汽,但

同时还受北面方向极地北冰洋地区水汽的影响. 10 月以后至次年 3 月[图 9(d)],水汽来源模式变

得较为单一,通过西风气流输送的水汽以及局地蒸发的水汽对该区降水影响居主导地位,且最为强烈. 由于后向轨迹模型只能模拟大尺度下气团的来源方向^[34],而对于气团的性质,则需要利用同位素数据进行进一步的分析.

4 结论

(1)对兰州及其周边区域实测的 243 个降水样品氢氧稳定同位素的分析,建立了兰州及其周边区域局地大气降水线方程(LMWL) $\delta D = 7.48 \delta^{18}O + 8.13$,反映了该区独特的局地气候特点. $\delta^{18}O$ 表现出显著的时空变化特征,从时间变化上看, $\delta^{18}O$ 值夏季高、冬季低;在空间变化上,由西至东加权平均 $\delta^{18}O$ 值呈减小趋势. 从全年尺度来看, d -excess 值变化趋势较为平稳,但不同时段下,也存在着一定的变化.

(2)该区大气降水中 $\delta^{18}O$ 与温度线性关系为正相关,而与降水量存在负相关关系,即:兰州及其周边区域既存在温度效应,同时还存在降水量效应,这表明该区独特的自然地理状况和气候特征(中高纬度大陆性气候和季风气候),大气降水具有不同的同位素过程和特征,降水水汽来源复杂.

(3)运用 HYSPLIT 模型对兰州及其周边区域大气降水水汽来源进行模拟,结果表明该区全年在大尺度下受西风水汽、局地水汽以及东南季风水汽的影响. 其中,西风水汽占主导作用,而东南季风水汽的影响在时间上有一定的局限性,主要集中在 6 月初至 8 月初这一时段.

参考文献:

- [1] Friedman I. Deuterium content of natural waters and other substances[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1953, **4**(1-2): 89-103.
- [2] Dansgaard W. The abundance of $\delta^{18}O$ in atmospheric water and water vapour[J]. *Tellus*, 1953, **5**(4): 461-469.
- [3] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [4] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, **16**(4): 436-468.
- [5] 庞洪喜,何元庆,张忠林,等. 季风降水中 $\delta^{18}O$ 与季风水汽来源[J]. *科学通报*, 2005, **50**(20): 2263-2266.
- [6] 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.
- [7] Liu Z F, Tian L D, Chai X R, *et al.* A model-based determination of spatial variation of precipitation $\delta^{18}O$ over China[J]. *Chemical Geology*, 2008, **249**(1-2): 203-212.
- [8] Zhang X P, Nakawo M, Yao T D, *et al.* Variations of stable isotopic compositions in precipitation on the Tibetan Plateau and its adjacent regions[J]. *Science in China (Series D)*, 2002, **45**(6): 481-493.
- [9] Tian L D, Yao T D, Schuster P F, *et al.* Oxygen-18 concentrations in recent precipitation and ice cores on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(D9): 4293-4302.
- [10] 李小飞,张明军,李亚举,等. 西北干旱区降水中 $\delta^{18}O$ 变化特征及其水汽输送[J]. *环境科学*, 2012, **33**(3): 711-719.
- [11] Liu J R, Song X F, Sun X M, *et al.* Isotopic composition of precipitation over arid Northwestern China and its implications for the water vapor origin[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, **19**(2): 164-174.
- [12] 章新平,刘晶淼,中尾正义,等. 我国西南地区降水中过量氘指示水汽来源[J]. *冰川冻土*, 2009, **31**(4): 613-619.
- [13] Zhang X P, Liu J M, Sun W Z, *et al.* Relations between oxygen stable isotopic ratios in precipitation and relevant meteorological factors in southwest China[J]. *Science in China (Series D)*, 2007, **50**(4): 571-581.
- [14] Liu J R, Song X F, Yuan G F, *et al.* Characteristics of $\delta^{18}O$ in precipitation over eastern monsoon China and the water vapor sources[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(2): 200-211.
- [15] 于津生,虞福基,刘德平. 中国东部大气降水氢、氧同位素组成[J]. *地球化学*, 1987, **16**(1): 22-26.
- [16] 李小飞,张明军,马潜,等. 我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 2924-2931.
- [17] 刘鑫,宋献方,夏军,等. 黄土高原岔巴沟流域降水氢氧同位素特征及水汽来源初探[J]. *资源科学*, 2007, **29**(3): 59-66.
- [18] 张明军,马潜,李亚举,等. 季风边缘区降水中 $\delta^{18}O$ 化特征及水汽来源分析——以兰州市为例[J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2011, **47**(6): 80-86, 93.
- [19] 黄天明,聂中青,袁利娟. 西部降水氢氧稳定同位素温度及地理效应[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, **22**(8): 76-81.
- [20] 章新平,中尾正义,姚檀栋,等. 青藏高原及其毗邻地区降水中稳定同位素成分的时空变化[J]. *中国科学*, 2001, **31**(5): 353-361.
- [21] 党瑜. 生态环境退化对兰州城市气候的影响[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2004, **34**(3): 355-358.
- [22] West A G, Golds G R, Brooks P D, *et al.* Discrepancies between isotope ratio infrared spectroscopy and isotope ratio mass spectrometry for the stable isotope analysis of plant and soil waters[J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2010, **24**(14): 1948-1954.
- [23] 章新平,孙维贞,刘晶淼. 西南水汽通道上昆明站降水中的稳定同位素[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, **14**(5): 665-669.
- [24] Wu J K, Ding Y, Ye B, *et al.* Spatio-temporal variation of stable isotopes in precipitation in the Heihe River Basin, Northwestern China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, **61**(6): 1123-1134.
- [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]. *勘探科学技术*, 1997, (3): 34-39.

- [26] Wang B, Lin H. Rainy season of the Asian-Pacific summer monsoon[J]. *Journal of Climate*, 2002, **15**(4): 386-398.
- [27] 卫克勤, 林瑞芬. 论季风气候对我国雨水同位素组成的影响[J]. *地球化学*, 1994, **23**(1): 33-41.
- [28] 章新平, 刘晶淼, 田立德, 等. 亚洲降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 沿不同水汽输送路径的变化[J]. *地理学报*, 2004, **59**(5): 699-708.
- [29] Yapp C J. A model for the relationship between precipitation D/H ratios and precipitation intensity[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1982, **87**(C2): 9614-9620.
- [30] Zhang X P, Yao T D, Liu J M, *et al.* Simulations of stable isotopic fractionation in mixed cloud in middle latitudes-taking the precipitation at Urumqi as an example [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20**(2): 261-268.
- [31] Thompson L G, Yao T D, Thompson E M, *et al.* A high-resolution millennial record of the south Asian monsoon from Himalayan Ice Cores [J]. *Science*, 2000, **289**(5486): 1916-1919.
- [32] Yu W S, Yao T D, Tian L D, *et al.* Relationships between $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and air temperature and moisture origin on a south-north transect of the Tibetan Plateau [J]. *Atmospheric Research*, 2008, **87**(2): 158-169.
- [33] Araguás-Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. Stable isotope composition of precipitation over Southeast Asia [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**(D22): 28721-28742.
- [34] Xie L H, Wei G J, Deng W F, *et al.* Daily $\delta^{18}\text{O}$ and δD of precipitations from 2007 to 2009 in Guangzhou, South China: Implications for changes of moisture sources [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, **400**(3-4): 477-489.

CONTENTS

Stable Carbon Isotopic Composition in PM _{2.5} in Nanjing Region	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (3727)
Distribution and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Atmospheric Particle in Taiyuan, China	HU Dong-mei, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (3733)
Study on Influence of Traffic and Meteorological Factors on Inhalable Particle Matters of Different Size	LUO Na-na, ZHAO Wen-ji, YAN Xing, <i>et al.</i> (3741)
Particle Emission Characteristics of Diesel Bus Fueled with Bio-diesel	LOU Di-ming, CHEN Feng, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (3749)
Characteristics of δ ¹⁸ O in Precipitation and Water Vapor Sources in Lanzhou City and Its Surrounding Area	CHEN Fen-li, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (3755)
Characteristics and Sources of Soluble Ions in Aerosols from Glacier No. 1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains, China	YUE Xiao-ying, LI Zhong-qin, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (3764)
Mechanism and Performance of Styrene Oxidation by O ₃ /H ₂ O ₂	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, YE Qi-hong, <i>et al.</i> (3772)
Sulfur Isotopic Signatures in Leaves of <i>Pinus massoniana</i> Lamb. and Source Apportionment	GUAN Hui, XIAO Hua-yun, ZHU Ren-guo, <i>et al.</i> (3777)
Comparisons of Sulfur Contents and Isotopes Between Mosses and Surface Soils in Jiangxi Province	LI Nan, XIAO Hua-yun, CHEN Yong-zhong, <i>et al.</i> (3782)
Research on Spatial Characteristic of Non-point Source Pollution in Liaohe River Basin	WANG Xue-lei, CAI Ming-yong, ZHONG Bu-qing, <i>et al.</i> (3788)
Spatial and Temporal Variations of Hydrological Characteristic on the Landscape Zone Scale in Alpine Cold Region	YANG Yong-gang, HU Jin-fei, XIAO Hong-lang, <i>et al.</i> (3797)
Distribution of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of Jinpu Bay	YOU Li-li, ZONG Hai-bo, ZHANG Shu-fang, <i>et al.</i> (3804)
Effects of Drying-Rewetting Alternation on Urease Activity in Chongming East Intertidal Flat; Results of a Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (3810)
Characterization of Microbial Activities in Marine Mudflat Sediment Using FDA Hydrolase Analysis	LIU Ye, ZOU Li, LIU Lu, <i>et al.</i> (3818)
Analysis of Ecological Risk and the Content Situation of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments from Northeast China River Basin	NIE Hai-feng, CHENG Hang-xin, ZHAO Chuan-dong, <i>et al.</i> (3825)
Residues and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments and Marine Organisms from Dapeng Bay, Shenzhen	SUN Run-xia, KE Chang-liang, GU Yang-guang, <i>et al.</i> (3832)
Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Two Mathematical Models for Runoff of the Shanghai Elevated Inner Highway, China	BIAN Lu, LI Tian, HOU Juan (3840)
Biomagnification of Heavy Metals in the Aquatic Food Chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir During Initial Impoundment	YU Yang, WANG Yu-chun, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3847)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Chlorophyll-a and Their Correlation Analysis in a Small Enclosed Lake	LI Fei-peng, ZHANG Hai-ping, CHEN Ling (3854)
Experiment and Model Simulation of Self-Purification Capacity of Nitrogen and Phosphorus in Lake Taihu	HAN Tao, ZHAI Shu-hua, HU Wei-ping, <i>et al.</i> (3862)
Simulation Research on the Release of Internal Nutrients Affected by Different Dredging Methods in Lake	CHEN Chao, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (3872)
Research of Urban Eutrophic Water Repair by Water/Sediment Biological Bases	ZHOU Hui-hua, SONG Xiao-guang, WU Ge, <i>et al.</i> (3879)
Effects of Regulatory Agent on the Heavy Metal Stability in Tidal Sediments	OU Feng-zhuang, SUN Guo-ping, XU Mei-ying (3888)
Impact of Regional Water Chemistry on the Phosphorus Isothermal Adsorption of the Sediments in Three Subsidence Waters of the Huainan Mine Areas	YI Qi-tao, SUN Peng-fei, XIE Kai, <i>et al.</i> (3894)
Adsorption Characteristics of f2 Bacteriophages by Four Substrates in Constructed Wetland	CHEN Di, ZHENG Xiang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3904)
Adsorption Characteristics of the Antibiotic Sulfanilamide onto Rice Husk Ash	JI Ying-xue, WANG Feng-he, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3912)
Study on the Stability Variation Mechanism of Humic Acid Water Solution After Radiated by the UV Light	WANG Wen-dong, ZHOU Li-chuan, DING Zhen-zhen, <i>et al.</i> (3921)
Comparison of As Removal Performance by Graphene/Iron-Based Material	Chaomuerlege, FENG Liu, HUO Yan-xia (3927)
Studies on the Dispersion and Deposition Behavior of Nano-TiO ₂ in Aquatic System	CHEN Jin-yuan, FANG Jin-feng, WEI Xiu-zhen (3933)
Effect of the Interaction of Microorganisms and Iron Oxides on Arsenic Releasing into Groundwater in Chinese Loess	XIE Yun-yun, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (3940)
Surface Modification of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Membrane by Using the Zwitterionic Substance	ZHOU Gui-hua, XIAO Feng, XIAO Ping, <i>et al.</i> (3945)
Estimate the Abatement Rate of Septic Tank Sewage Outfall Soil on Nitrogen Pollutants of Typical Farmer Household Sewage	ZHOU Feng, WANG Wen-lin, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (3954)
Wastewater Pollution Characteristics from Typical Intensive Pig Farms in the Pearl River Delta and Its Ecological Risk Assessment	LI Wen-ying, PENG Zhi-ping, YU Jun-hong, <i>et al.</i> (3963)
Effects of Sludge Compost Used as Lawn Medium on Lawn Growth and Soil and Water Environment	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, CHEN Ruo-xia, <i>et al.</i> (3969)
Influencing Factors of Floc Size Distribution and Fractal Dimension of Activated Sludge	LI Zhen-liang, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li, <i>et al.</i> (3975)
Influence of Different Recovery Methods on the Activity of Nitrification Granular Sludge	GUO Xiu-li, GAO Da-wen, LU Jian-cong (3981)
Study on Hydrogen Autotrophic Denitrification of Bio-ceramic Reactor	CHEN Dan, WANG Hong-yu, SONG Min, <i>et al.</i> (3986)
Studies on Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow	YAN Jun-xia, LI Jun-jian, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (3992)
Modeling of CO ₂ Fluxes at Cropland by Using SIB3 Model	ZHANG Geng-jun, LU Li-xin, JIANG Ling-mei, <i>et al.</i> (4000)
Effects of the Different Land Use on Soil Labile Organic Matter and Carbon Management Index in Junyun Mountain	XU Peng, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4009)
Heavy Metal Content in Street Dust and Environmental Risk Assessment of Agricultural City: A Case Study of Xuchang City	YAN Hui, CHEN Jie, XIAO Jun (4017)
Polybrominated Diphenyl Ethers and Polychlorinated Biphenyls in Road Dust from Suzhou, Wuxi and Nantong	SHI Shuang-xin, DONG Liang, LI Ling-ling, <i>et al.</i> (4024)
Vertical Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Abandoned Vehicles Dismantling Area Soil	WU Yan-yu, HU Xiao-ying, HONG Hong-jia, <i>et al.</i> (4031)
Stabilization and Long-term Effect of Chromium Contaminated Soil	WANG Jing, LUO Qi-shi, ZHANG Chang-bo, <i>et al.</i> (4036)
Leaching Characteristics of Sulfadiazine and Sulfamethoxazole in Soil Column	LI Man, CHEN Wei-ping, WEI Fu-xiang, <i>et al.</i> (4042)
Transport Behaviors of Metal Oxide Nanomaterials in Various Soils	FANG Jing, YU Bo-yang (4050)
Fractal Characteristics of Capillary Finger Flow for NAPLs Infiltrated in Porous Media	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4058)
Allelopathic Potential of <i>Phyllostachys edulis</i> on Two Dominant Tree Species of Evergreen Broad-leaved Forest in Its Invasive Process	BAI Shang-bin, ZHOU Guo-mo, WANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4066)
Preliminary Studies on the Occurrence of Antibiotic Resistance Genes in Typical Aquaculture Area of the Pearl River Estuary	LIANG Xi-mei, NIE Xiang-ping, SHI Zhen (4073)
Concentrations and Safety Evaluation of Heavy Metals in Aquatic Products of Yancheng, Jiangsu Province	LIU Yang, FU Qiang, GAO Jun, <i>et al.</i> (4081)
Effects of Cu ²⁺ Stress on DNA Polymorphism of Genome in Foxtail Millet of Different Genotypes	ZHANG Yi-xian, FU Ya-ping, XIAO Zhi-hua, <i>et al.</i> (4090)
Research on Soil Bacteria Under the Impact of Sealed CO ₂ Leakage by High-throughput Sequencing Technology	TIAN Di, MA Xin, LI Yu-e, <i>et al.</i> (4096)
Microeukaryotic Biodiversity in the Waste Ore Samples Surrounding an Acid Mine Drainage Lake	LI Si-yuan, HAO Chun-bo, WANG Li-hua, <i>et al.</i> (4105)
Characteristics and Functional Protein Analysis of an Effective Decabromodiphenyl Ether-Degrading Strain	CHANG Jing-jing, YIN Hua, QIN Hua-ming, <i>et al.</i> (4112)
Effect of Selenium on the Uptake and Translocation of Manganese, Iron, Phosphorus and Selenium in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, <i>et al.</i> (4119)
Effect of Exogenous Iron on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of Tomato	LIU Jun, ZHOU Kun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4126)
Analysis of Control Policy for Persistent Toxic Substances from Electronic Wastes in China	LI Li, LÜ Yong-long, WANG Tie-yu (4132)

《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)

2013年10月15日 34卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 10 Oct. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行