

ISSN 0023-074X

CN 11-1784/N

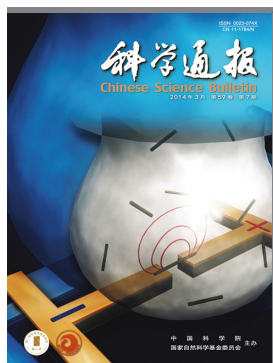
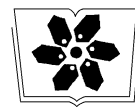
科学通报

Chinese Science Bulletin

2014年3月 第59卷 第7期



中国科学院
国家自然科学基金委员会 主办



2014年3月,第59卷,第7期

封面说明: 一维纳米材料纳米线在纳米器件制备领域有着巨大的潜力,其化学、电学等特性得到学者们的大量研究,但是纳米线的拉伸动态特性受制于检测手段的不完善,并未得到充分的研究.原子链是一种比纳米线尺寸更小的一维纳米结构材料,表现出很多特异的物理特性,同样在纳米器件和原子器件制备领域有着巨大的潜力,通常采用拉伸纳米线的方法制备.借助微电子机械系统(MEMS)技术可以制造纳米线拉伸特殊微动机构芯片,该芯片可以用来研究单纳米线拉伸动态特性及原子链拉伸的制造,从而掌握其在拉伸状态下的动态特性变化和单原子链状态下的特殊性质并向原子器件制造方向发展.针对该纳米线拉伸特殊微动机构芯片的特殊结构,采用一系列处理工艺和微滴定介电泳平台,实现了单根纳米线在超高微电极上的有效精确装配,为最终实现纳米线的拉伸及原子链拉伸制造研究迈出最关键的一步.封面是采用微滴定介电泳平台在纳米线拉伸特殊微动机构芯片进行纳米线装配的示意图.详见黄超雷等人文(p623).

《科学通报》编辑部

地址:北京市东城区东黄城根北街16号 《中国科学》杂志社

邮编:100717

网址:www.scichina.com csb.scichina.com

信箱:csb@scichina.org

主任	安瑞	010-64036120	anrui@scichina.org	(兼生命科学编辑)
副主任	张莉	010-64012686	zhangli@scichina.org	(兼地球科学编辑)
责任编辑	邹文娟	010-64036120	zouwenjuan@scichina.org	(物理学 天文学 信息科学)
	王晶	010-62567305	wangj@scichina.org	(物理学 力学 工程科学)
	智欣	010-62567305	zhixin@scichina.org	(化学 材料科学)
	王元火	010-64015905	wyh@scichina.org	(生命科学)
	孙红梅	010-64036120	shm@scichina.org	(生命科学)
	林琳	010-64012686	linlin@scichina.org	(地球科学)
	闫蓓	010-64008316	yanbei@scichina.org	(新闻采编)

本期责任编辑 王晶

封面设计 胡煜

评述

材料科学

537 高电压正极材料在全固态锂离子电池中的应用展望

田君, 金翼, 官亦标, 苏岳锋, 包丽颖, 陈实, 吴锋

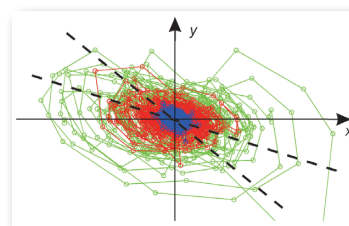
电动汽车和规模化储能用途的锂离子电池在现代社会中发挥着越来越重要的作用. 全固态锂离子电池有望从根本上解决传统锂离子电池的安全性问题, 而其大容量化和长寿命的实现则有赖于高电压正极材料在其中的应用.

计算机科学技术

551 推荐系统托攻击模型与检测技术

伍之昂, 王有权, 曹杰

总结推荐系统托攻击模型构成和分类、托攻击危害性衡量和检测指标、3类托攻击检测算法及实验数据集合方法等方面的研究进展, 并指出该领域今后值得进一步研究的方向.



▲ 陈幸等 p561

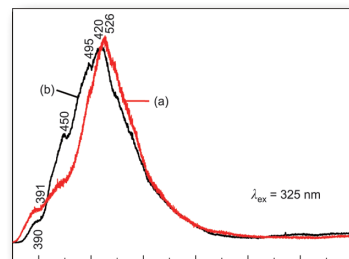
论文

生物物理

561 基于sEMG振子模型的骨骼肌等长收缩力与固有特性的能量核表征方法

陈幸, 殷跃红, 范渊杰

通过将EMG信号转变为相图, 建立了EMG信号分析的能量核方法, 能够准确表征肌肉力, 并导出了EMG信号的自然频率, 可实现直观信噪识别.



▲ 周静等 p572

物理化学

572 简单湿化学法制备八面体Sb₂O₃纳米晶及其光学特性

周静, 赵赫威, 郭林

在无表面活性剂的情况下, 以简单的湿化学法制备了八面体Sb₂O₃纳米晶. 探讨了反应温度影响产物形成的机理, 分析了样品的红外、拉曼、光致发光光谱等光学特性.

环境化学

578 辽河口海域短链氯化石蜡污染特征及生物富集

陈晨, 马新东, 国文, 赵元凤, 吕景才, 王震, 姚子伟

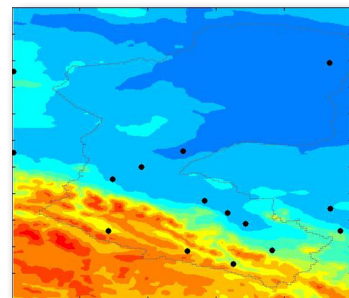
辽河口海域沉积物和生物中SCCPs同系物主要以低溴代为主, 且河流输入是其主要来源途径. 软体动物对SCCPs表现出明显的富集作用, 受生活习性及其理化性质的影响, 不同物种间存在一定的差异.

地质学

586 鲁东晚白垩世中-晚期恐龙多样性事件: 恐龙蛋化石提供的证据

赵资奎, 张蜀康, 王强, 汪筱林

鲁东地区上白垩统王氏群不同类型恐龙蛋壳的水蒸气传导率的研究, 反映了不同的孵化环境. 根据蛋壳 $\delta^{18}\text{O}$ 记录显示从晚白垩世中期到晚期, 该地区由湿润变为较干燥的气候环境. 证明气候环境的变化是引起该地区恐龙多样性事件的原因.



▲ 熊喆等 p605

593 孔兹岩系——贺兰山中段赵池沟岩组碎屑锆石LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学、Hf同位素组成及其地质意义

李黎明, 曾佐勋, 陆彦俊, 魏运许, 向世民, 潘黎黎

论证了贺兰山中段赵池沟岩组属于华北克拉通孔兹岩系的组成部分. 采用碎屑锆石U-Pb定年、Hf同位素手段深入研究了这套副变质岩的成岩时间、物源属性、变质时间, 并为西部陆块的增生演化问题提供了数据基础.

大气科学

605 黑河流域高分辨率区域气候模式建立及其对降水模拟验证

熊喆, 延晓冬

以区域环境集成系统模式为基础,对模式中重要参数进行重新率定,建立适合黑河流域高分辨率区域气候模式.该研究弥补了黑河流域观测站点少的缺陷,将为“黑河流域生态-水文过程集成研究”重大研究计划提供高时空分辨率科学数据.

615 巴丹吉林沙漠腹地降水事件后的沙山蒸发观测

马宁, 王乃昂, 赵力强, 张振瑜, 董春雨, 沈士平

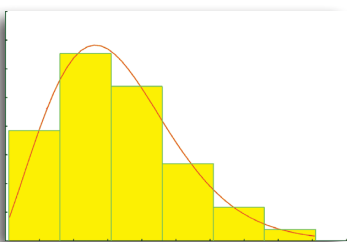
利用沙漠腹地的自动气象站和涡度相关系统等实测数据,分析了不同降水事件后的沙山蒸发,发现高大沙山上的大气降水并不能入渗补给地下水,表明高大沙山上的大气降水对腹地湖泊没有显著补给作用.

机械工程

623 单根铜纳米线在超高悬空微动电极上的微滴介电泳装配研究

黄超雷, 曾鸿江, 田孝军, 刘杰, 董再励, 李铁, 王跃林

研制出了一套微滴介电泳实验平台和装配技术,可用于超高悬空电极的纳米线精确装配,为实现纳米线的动态拉伸性质研究及原子链拉伸制造研究迈出最关键的一步.



▲ 马宁等 p615

简报

630 中纬度亚洲降水年际变化的空间差异与环流异常

黄伟, 陈发虎, 冯松, 陈建徽, 张肖剑

巴丹吉林沙漠腹地降水事件后的沙山蒸发观测

马宁, 王乃昂*, 赵力强, 张振瑜, 董春雨, 沈士平

兰州大学资源环境学院, 兰州大学干旱区气候变化与水循环研究中心, 兰州 730000

* 联系人, E-mail: wangna@lzu.edu.cn

2013-06-07 收稿, 2013-11-01 接受, 2014-01-03 网络版发表

国家自然科学基金(41371114)、国家环保公益性行业科研专项(201209034)、国家基础科学人才培养基金(J1210065)和教育部高等学校博士学科点基金(20100211120006)资助

摘要 巴丹吉林沙漠腹地高大沙山和湖泊的形成机理一直是学术界研究的热点, 其中关于高大沙山上大气降水能否入渗补给地下水一直存在较大争议. 本文基于沙漠腹地的 2 年降水观测和沙漠边缘的长时间尺度降水资料, 结合概率分布模型和日降水极值重现期分析, 对沙漠地区的降水等级进行了划分, 并利用沙漠腹地的自动气象站和涡度相关系统的观测数据, 对不同等级降水事件后的沙山蒸发进行分析. 结果显示, 沙漠地区的降水事件可分为 3 类, 即 5 mm 以下的常规降水事件 CP(占总降水的 90%以上)、20 mm 左右的普通年份最大日降水 OAM 和数十年一遇的极端强降水事件 EP. CP 和 OAM 事件后, 降水分别约需 1~3 d 和 3~4 周可被蒸发出地表, EP 事件后水分则需较长的时间方可蒸发出地表. 三类降水事件的累积蒸发与累积降水表明, 高大沙山上的大气降水对地下水没有显著补给作用. 本研究对深入探讨巴丹吉林沙漠腹地湖泊群的形成机理有重要价值.

关键词

降水
蒸发
入渗
极值重现期
涡度相关
巴丹吉林沙漠

巴丹吉林沙漠腹地因广泛分布相对高度逾 300 m 的高大沙山和众多湖泊, 一直以来都是地学界关注的热点^[1-7]. 在降水稀少、蒸发力甚大的沙漠腹地, 由于缺少地表径流, 湖泊的存在必然受到了地下水补给, 而地下水又源于何处? 早期的学者认为沙漠腹地的高大沙山具有“汇水”作用^[8-11], 即沙丘沙自身较大的松散性^[7]可使沙山上的大气降水迅速入渗补给地下水, 进而补给湖泊, 尽管该区降水稀少, 但沙山汇水面积约为湖泊面积 10 倍, 故可平衡湖泊的蒸发损失. Chen 等人^[3]却指出源于祁连山及青藏高原的冰雪融水渗漏, 通过断裂带补给了巴丹吉林沙漠地下水和湖泊. 因此, 巴丹吉林沙漠腹地沙山上的大气降水能否入渗补给地下水始终存在较大争议. Yang 等人^[1]基于水量平衡计算和水化学数据分析结果指出, 巴丹吉林沙漠东南部的地下水主要由大气降水下渗补给. 赵景波等人^[12]实测了腹地高大沙山不同部位

沙层剖面含水量的垂直变化趋势, 认为沙漠腹地水分存在“正平衡”, 即大气降水可快速入渗至沙山中下部. 然而, 陈建生等人^[5]跟踪测量了沙漠腹地降水事件后的沙层含水量变化, 发现 10.6 mm 的降水仅能下渗至 13 cm 深处, 并于 1 周内被逐渐蒸发. 董春雨^[13]在该沙漠腹地实施的人工模拟降水实验表明, 30 mm 的降水仅能下渗 40 cm 左右, 不存在继续入渗补给地下水的可能. 早期的能量平衡试验显示^[6], 由于沙漠地区蒸发力较强, 巴丹吉林沙漠腹地高大沙山上的大气降水和凝结水皆可被完全蒸发. 基于上述不同观点, 本文利用位于巴丹吉林沙漠腹地的自动气象站和涡度相关系统获得的第一手观测数据, 在揭示腹地降水特征的前提下, 分析腹地不同降水事件之后的沙山蒸发过程, 旨在为巴丹吉林沙漠腹地沙山上的大气降水能否入渗补给地下水的研究提供科学依据.

引用格式: 马宁, 王乃昂, 赵力强, 等. 巴丹吉林沙漠腹地降水事件后的沙山蒸发观测. 科学通报, 2014, 59: 615-622

英文版见: Ma N, Wang N A, Zhao L Q, et al. Observation of mega-dune evaporation after various rain events in the hinterland of Badain Jaran desert. Chin Sci Bull, 2014, 59: 162-171, doi: 10.1007/s11434-013-0050-3

1 观测试验与数据处理

1.1 观测试验

巴丹吉林沙漠(图 1)位于中国内蒙古阿拉善高原西部,其范围大致为合黎山、北大山以北,拐子湖、古居延泽之南,雅布赖山之西北,黑河正义峡出口、弱水东岸至古日乃湖以东,东西长约 442 km,南北宽约 354 km,面积约 5.21 万 km^2 ,系中国第二大沙漠^[14]. 该区夏季平均气温 25.3°C ,冬季平均气温 -9.1°C ,平均气温年较差达 34.4°C ,属典型的“冷沙漠”^[15]. 沙漠南缘年降水量为 90.1~115.4 mm,北缘仅 35.2~42.9 mm,区域多年平均约 76.9 mm^[16]. 本研究小组于 2009 年 12 月首先在沙漠腹地的苏木巴润吉林丘间地处布设了 Vaisala MAWS301 型自动气象站(图 1,以下简称 V1 站),其中降水的观测频率为 1 h 一次. 2012 年 3 月 22 日于苏木巴润吉林东部高大沙山的中下部建立了涡度相关(eddy covariance, EC)系统(图 1,以下简称 E1 站),拔湖(相对于苏木巴润吉林)高度为 80 m,其中 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪(Li-Cor, LI-7500A 型)和三维超声风速仪(GILL, R3-50 型)安装于 2.5 m 高处,观测频率皆为 10 Hz. 除此之外,温湿传感器(Vaisala, HMP155 型)安装于 2 m 高处,以观测气温和相对湿度;四分量辐射表(Hukseflux, NR01 型)安装于 1.5 m 高处,以观测向上/下短波辐射通量和向上/下长波辐射通量;自校准型土壤热通量板(Hukseflux, HFP01SC 型)安装于 15 cm 深处以观测土壤热通量;土壤温度传感器(Campbell Scientific, ST-100 型)安装于 2 和 15 cm 深处(用以估算 0~15 cm 的土壤热通量);土壤湿度传感器(Decagon, EC-5 型)分别安装于地下 45 和

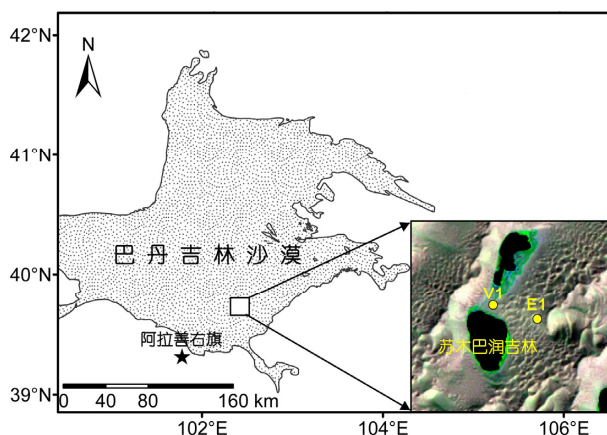


图 1 观测点地理位置示意图

65 cm 深处;上述气温、相对湿度、四分量辐射、土壤温湿度和土壤热通量皆选用 30 min 平均值. 同时,配备了翻斗式雨量筒(Onset, HOBO R3-GM 型)用于 E1 站大气降水的实时观测. 本文所用 V1 站观测的降水数据起止时间为 2010 年 1 月 1 日~2011 年 12 月 31 日;E1 站的观测数据起止时间为 2012 年 3 月 25 日~10 月 31 日(其中 2012 年 5 月 9 日~6 月 26 日因 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪故障导致观测中断). 上述所有沙漠腹地的观测数据皆以北京时间为准. 另外,沙漠南缘的阿拉善右旗气象站(图 1)日降水资料源于中国气象科学数据共享服务网.

1.2 数据预处理

运用 EddyPro Express 软件对 EC 的 10 Hz 原始数据进行了野点去除、趋势订正、二次坐标旋转^[17]、时间延迟修正、感热通量的超声虚温修正^[18]、频率响应修正^[19]和 WPL 修正^[20],最后求解出 30 min 平均的感热通量 H 和潜热通量 LE. 与此同时,基于 Kljun 等人^[21]提出的通量足迹模型计算了观测期内 E1 站的平均通量源区(flux footprint),结果显示,通量的最大贡献源来自距离观测点东南部 42.7 m 处,90%的源区位于 116.9 m 范围内,而此区域内的地形较为平坦,基本满足通量观测要求,且 E1 观测点距离湖泊在 1000 m 以远,故本文所用 EC 的观测数据,排除了下垫面非匀质性(指沙漠与湖泊交错)对涡度相关系统带来的影响^[22],所测能量与物质通量皆代表典型沙丘表面. 最后,在估算了 0~15 cm 土壤热存储的基础上,笔者利用 OLS 法^[23]评估 EC 数据的整体质量,得到该区能量闭合度为 85.9%(详细计算过程参见文献^[24]),与诸多观测试验相近^[23,25,26],表明 E1 站的观测数据有较高的可信度.

2 沙漠降水特征

2.1 沙漠腹地的降水观测

准确揭示沙漠腹地大气降水的蒸发与入渗过程需首先了解腹地的降水规律. 笔者选取 V1 站 2010 年 1 月 1 日~2011 年 12 月 31 日期间的连续观测数据以分析沙漠腹地降水特征. 由图 3 可见,沙漠腹地年降水量和年降水日数(日降水量 ≥ 0.1 mm 为一个降水日)皆较少,2010 和 2011 年腹地年降水量分别为 100.6 和 72.8 mm,年降水日数分别为 48 和 23 d. 除此之外,

沙漠腹地绝大多数(占 91.5%)日降水量不超过 5 mm; 单日降水量逾 20 mm 的现象较为罕见, 此两年间仅于 2010 年 5 月 25 日和 9 月 20 日分别出现了 23.8 和 22.4 mm 两次较强的降水事件. 对比腹地与外围降水特征(图 2)可知, 腹地与南缘阿拉善右旗降水量的年内降水分布趋势(主要出现在 5~9 月)和日降水量等级分布(皆以 ≤ 5 mm 为主)极为相似.

2.2 长时间尺度的沙漠地区日降水量统计特征

鉴于上述腹地降水分析仅基于 2 年的观测数据, 笔者又统计了沙漠南缘阿拉善右旗气象站 1960~2011 年的日降水数据(图略), 发现其年降水量和年内降水日数皆有较大波动, 二者变异系数分别为 0.25 和 0.14. 1960~2011 年间, 年降水量变化范围为 59.2~188.1 mm, 平均值为 116.3 mm. 年降水日数介于 28~54 d, 平均 40 d a⁻¹, 亦即沙漠地区一年中约 10%的天数发生降水. 除此之外, 就年内最大日降水量(annual maximum, AM)而言, 1960~2011 年间, 有 24 a 的 AM 小于 20 mm; 另外的 28 个统计年中, 每年日降水 ≥ 20 mm 的现象亦仅 1~3 次(图 3). 上述分析, 一方面表明腹地的 2 年降水观测结果与沙漠地区降水的平均状态较为接近, 可代表腹地的降水特征; 另一方面, 也证明笔者推出的巴丹吉林沙漠“日降水多为 5 mm 以下, 大于 20 mm 的现象较为罕见”之结论有较高的可信度, Zhao 等人^[27]在该沙漠邻近地区的研究亦支持这一结论.

就强降水而言, 1960~2011 年间阿拉善右旗气象站日降水 30~40 mm 的事件仅有 7 次, 40 mm 以上仅 2 次(其中发生于 1974 年 7 月 30 日的 50.3 mm 降水

事件是沙漠地区近 52 年的最大日降水), 可见沙漠地区发生强降水的频率极低. 关于中国塔克拉玛干沙漠^[28]、南美阿塔卡马沙漠^[29]的强降水研究亦有类似结论. 与此同时, 为了重建降水极值分布特征, 笔者对阿拉善右旗气象站 1960~2011 年间各年 AM 序列进行频率分布统计^[30], 对比了 60 种概率分布模型的拟合效果, 并用 Kolmogorov-Smirnov 法检验各概率分布模型的拟合优度^[31,32], 比较各模型的理论分布函数与经验分布函数的差值 D ^[32], 结果发现, 四参数的 Burr 概率分布对应的差值最小($D=0.05561$), 其拟合效果最优(图 4), 且置信水平在 99%以上. 按照极值重现期的定义^[33], 如果某一气候要素极值的概率分布函数为 $F(x)$, 那么该气候要素极值 T 年一遇的重现期为 $T=1/F(x)$. 据图 4 计算, 阿拉善右旗 50 年(即 $F(x)=0.02$)一遇的年内最大日降水 $AM \geq 45.3$ mm. 与此同时, $AM \geq 20$ mm 的概率为 0.335, 表明理论上巴丹吉林沙漠约每 3 年才出现 1 次日降水超过 20 mm 的现象.

3 沙漠腹地陆面蒸发特征

基于上述巴丹吉林沙漠降水特征的分析, 笔者将该沙漠降水分为 3 种: (1) 常规降水事件(conventional precipitation, CP), 指小于 5 mm 的降水事件, 腹地约 90%的降水记录皆属此类(图 2); (2) 普通年份的最大日降水(ordinary annual maximum, OAM), 即约 20 mm 的降水事件, 过去 52 年来, 部分年份可发生 1~3 次 OAM 事件, 部分年份甚至无此现象(图 3); (3) 极端强降水事件(extreme precipitation, EP), 指 40 mm 以上的降水事件, 其出现的概率极低, 属几十年一遇的

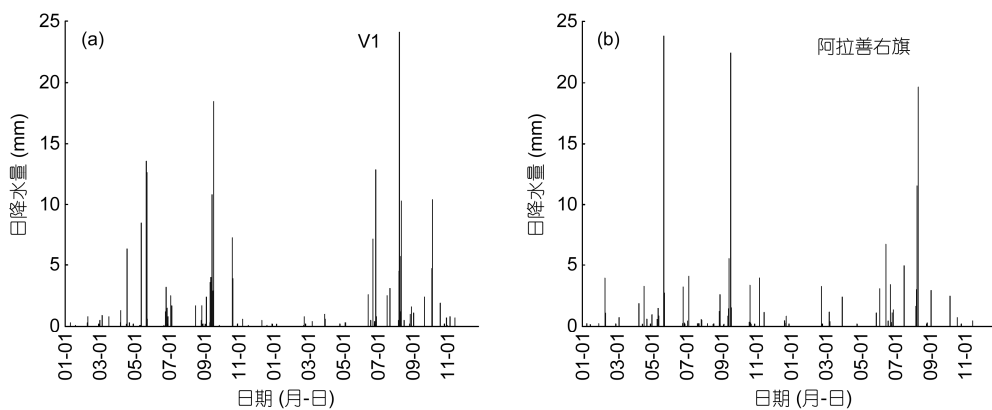


图 2 2010~2011 年沙漠腹地 V1 站(a)与沙漠南缘阿拉善右旗气象站(b)日降水量

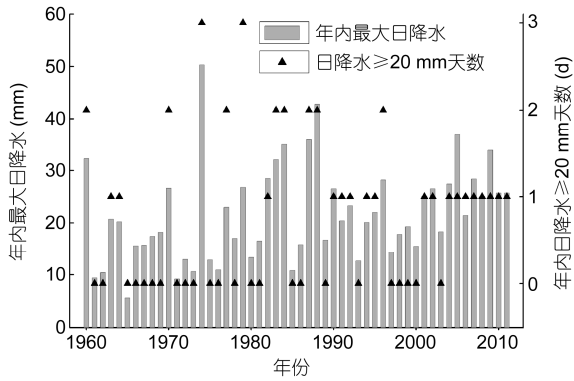


图3 阿拉善右旗1960~2011年内最大日降水分布及每年日降水≥20 mm 天数

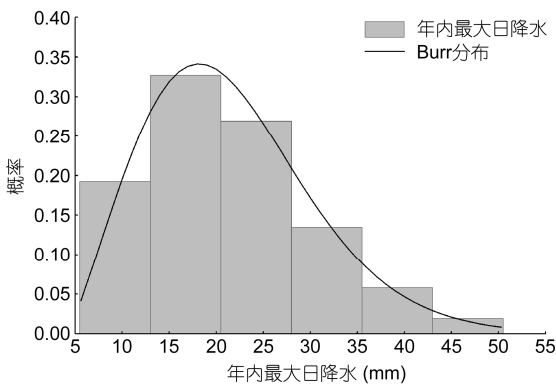


图4 阿拉善右旗年内最大日降水频率分布(柱状)与四参数 Burr 拟合(曲线)

现象, 例如1960~2011年间, 沙漠南缘的阿拉善右旗仅发生2次极端强降水事件(图3)。

3.1 常规降水事件 CP 后的沙漠陆面蒸发

2012年4月11日09:56~11:15沙漠腹地发生了1次4.0 mm的降水事件(图5(a)). EC在降水结束4 h

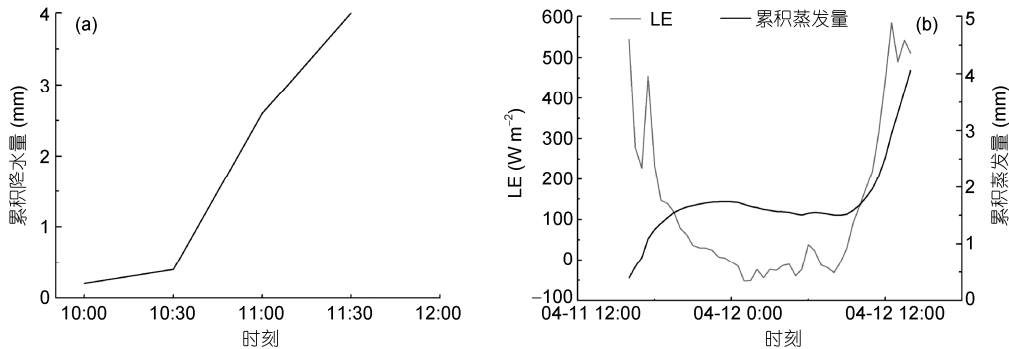


图5 2012年4月11日E1站降水历时曲线(a)和降水结束后的LE与累积蒸发(b)

后即恢复正常观测(图5(b)), 结果显示, 16:00时沙漠地表的潜热通量LE最高可达 500 W m^{-2} , 波文比(H/LE)甚至小于0.1, 远低于晴天沙漠地区波文比. 时至夜晚地表温度开始降低, 因降水后空气中水汽含量较大, 当地表温度降至露点温度以下时, 出现明显的凝结现象(即LE为负). 4月12日上午LE逐渐升高, 暗示强烈的蒸发作用仍在持续. 结合累积蒸发量可见(图5(b)), 从4月11日16:00~4月12日14:00(共22 h)累积蒸发即超过4.0 mm, 表明4 mm的降水事件结束后的1 d内, 其水分即被全部蒸发。

3.2 普通年份最大日降水事件 OAM 后的沙漠陆面蒸发

2012年6月27日02:37~12:19发生1次12.6 mm的降水事件(持续时间约10 h), 6月28日17:13~20:09发生1次7.8 mm的降水事件(持续时间约3 h), 相隔1 d的2次降水事件累积降水量达20.4 mm(图略), 笔者将2次降水事件作为一个整体, 按沙漠地区普通年份的最大日降水量OAM分析。

由图6(a)可见, 6月27日中午降水停止后的12 h内, 陆面蒸发量即达2.3 mm, 之后的6月28日(辐射观测显示为阴天)亦有2.8 mm, 6月29日蒸发量甚至达到3.6 mm, 但之后随着沙山表层含水量的减小, 蒸发亦开始减小. 截至7月3日15:00再次发生降水之前, 其累积蒸发量达13.4 mm, 暗示降水结束后约6 d内已有2/3的降水被蒸发. 地表蒸发速率随7月6日降水事件而增大, 之后亦逐渐减小, 7月17日与之类似(图6(a)). 总体而言, 从2012年6月27日0时~7月20日12时(7月20日12时以后即出现强降水), 观测点E1处累积降水量28.0 mm, 而累积蒸发为26.2 mm(图6(b)), 仅剩余1.8 mm尚未蒸发出地表,

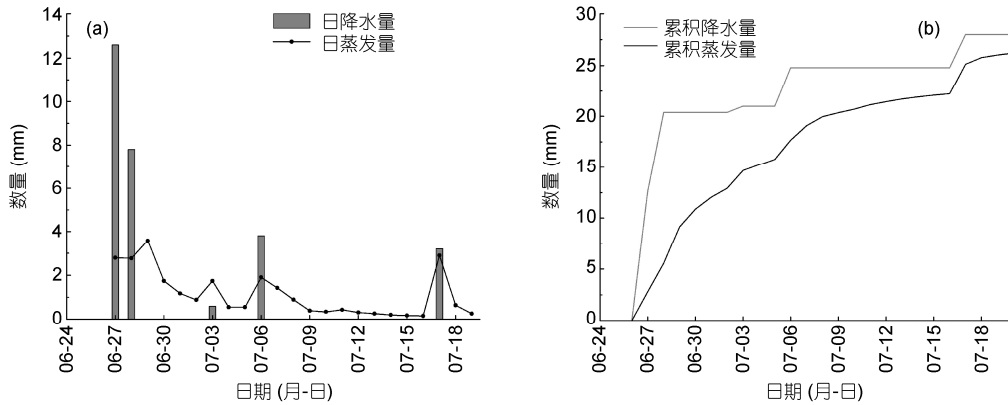


图 6 2012 年 6 月 27 日 0:00~7 月 20 日 12:00 期间 E1 站日降水与日蒸发(a)以及累积降水与累积蒸发(b)

倘若延续无降水现象, 应于一周内即可完全蒸发. 另一方面, 上述时间段内土壤湿度观测表明(图 7), 45 cm 深处沙层体积含水量略有增大, 而 65 cm 深处沙层体积含水量始终未见明显变化, 暗示该时段内湿润锋前到 45~65 cm 之间, 亦即 20 mm 左右的大气降水未入渗至 65 cm 以下, 所以不可能对地下水有补给作用. 陈建生等人^[5]亦曾对该沙漠降水事件后的地表湿沙层进行连续测量, 指出 10.6 mm 的大气降水只能渗入地下 13 cm 左右, 且在降水结束后 1 周内被蒸发出地表, 这与本文结果较为一致.

3.3 极端强降水事件 EP 后的沙漠陆面蒸发

2012 年 7 月 20 日中午起, 沙漠腹地发生了 1 次 43 mm 的极端强降水事件 EP. 该降水事件发生于 12:42~18:06, 期间 13:00~14:00 的小时降水量达 26 mm, 略大于塔克拉玛干沙漠腹地曾报道的 19.6 mm h⁻¹

的降水强度^[34]. 当日处于沙漠南缘的阿拉善右旗气象站亦有 48.8 mm 的降水记录, 证明腹地观测较为准确.

7 月 20 日降水结束后的第一天(即 7 月 21 日), 陆面蒸发量达 3.3 mm, 随后的 5 d 内, 日蒸发量平均可达 1.7 mm, 指示强烈的蒸发过程. 随着表层含水量的逐渐降低, 地表蒸发速率减缓, 因此 7 月 27~28 日蒸发量降至 0.5 mm 左右. 与此同时, 随着降水的再次发生, 陆面蒸发回升, 持续一段时间后蒸发又逐渐减小(图 8(a)). 需要指出, 即便蒸发较为缓慢, 然因湿沙层水分含量较小, 故必然不足以下渗补给地下水. 当然, 越强的降水事件会使渗入沙层的深度越大, 故其蒸发出地表所需之时间亦越长, 但很难能下渗数米深而补给地下水. 具体而言, 从 7 月 20 日起进行累积蒸发至 9 月 1 日的 43 d 内(图 8(b)), 累积蒸发即达到 45.5 mm, 超过了极端降水事件的 43 mm, 暗示 EP 降水已被蒸发出地表.

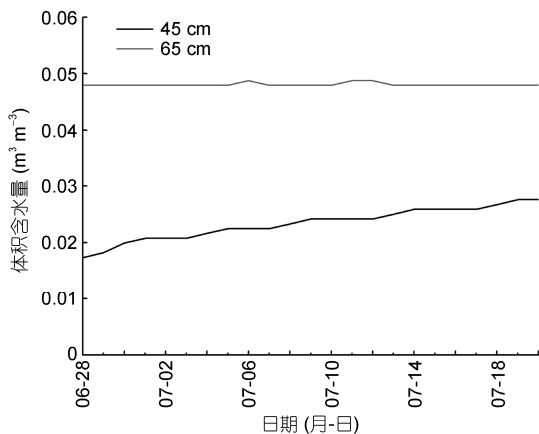


图 7 2012 年 6 月 28 日 0:00~7 月 20 日 0:00 期间 E1 站 45 和 65 cm 处沙层体积含水量变化

4 讨论

尽管存在能量不闭合现象^[23]和 EC 自身的随机误差^[35], 然而 EC 仍被视为测量生态系统蒸散发最为准确的手段之一^[36], 并在森林^[37]、草原^[38,39]、农田^[26]、荒漠^[40,41]等蒸散发研究中得到了广泛应用. 本文利用位于沙漠腹地沙山中下部的 EC 所测数据分析了不同降水事件后的沙山蒸发过程, 结果显示, 即便是大于 40 mm 的极端降水事件, 水分亦难以入渗补给地下水, 表明巴丹吉林沙漠腹地湖泊水分主要来源并非大气降水. 需要指出, 沙漠腹地的降水历时一般较短, 而陆面蒸发系持续性过程. 例如, 就强降水事件后累积降水与累积蒸发的变化而言(图 8(b)), 随时间推移, 二者之差逐渐减小, 表明极端降水事件后, 湿

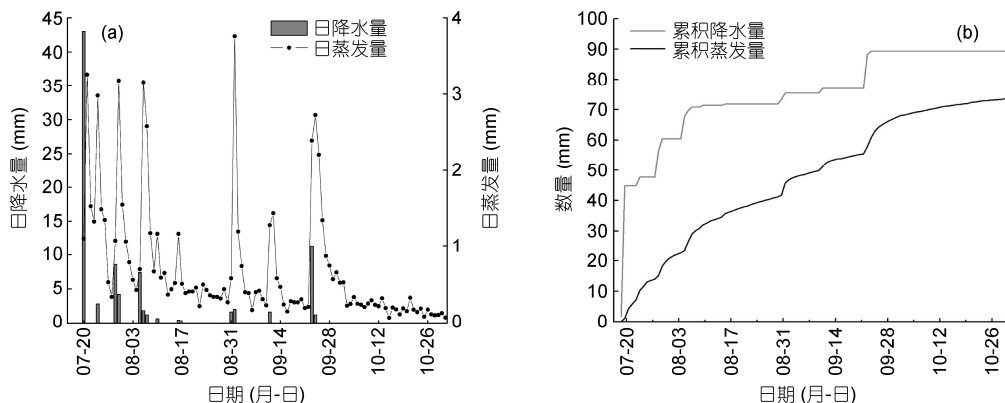


图8 2012年7月20日~10月31日E1站日降水与日蒸发(a)和累积降水与累积蒸发(b)

润锋首先进至沙层的某一深度，然而累积蒸发一直“追赶”累积降水，暗示降水又被逐渐蒸发出地表。

在降水稀少的干旱地区，研究大气降水能否入渗补给地下水对当地水资源的合理利用有重要意义。Xu 等人^[42]基于矩阵分布式蒸渗仪的观测结果指出，河西沙漠地区至少 91%的降水会被蒸发出地表，剩余部分则保存于沙层中。毛乌素沙地的蒸发入渗实验显示，10 mm 的降水可于 15 d 内蒸发出地表^[43]。黄土高原地区土壤水、大气降水和地下水的稳定氢氧同位素和水化学数据分析表明，当地的大气降水不能入渗补给地下水^[44]。然而本课题组在巴丹吉林沙漠的野外考察发现，一般情况下地表的干沙层仅仅厚 20 cm 左右，其下即为明显的湿沙层。顾慰祖等人^[6]所测高大沙山 2 m 深处孔隙水含水量可达沙丘田间持水量的 65%，绝非沙漠地区稀少的降水量所能支持的。早期的高大沙山陆面能量平衡实验表明，沙山的年蒸发量大于凝结水与大气降水之和，故有学者推测沙山下部的地下水补给了陆面蒸发^[6]。Chen 等人^[3,5]认为地下水通过薄膜水形式流到非饱和和沙漠中形成湿沙层，湿沙层的薄膜水通过蒸发向地表排泄，沙山湿沙层的水分源于地下水，地下水将沙颗粒黏结在一起，大大提高抵抗风蚀的能力，形成了固定沙山，即地下水维系了高大沙山和湖泊景观。同位素研究表明，巴丹吉林沙漠地下水的氘氧同位素值异常^[1,5]，偏离全球大气降水线^[3,5]，暗示该沙漠腹地

的地下水受到强烈蒸发，并得到了沙层 40 cm 以下的土壤中氘氧同位素分析的验证^[45]。相关研究表明，在临界蒸发深度以上，埋深越大的潜水蒸发越弱^[46,47]。本研究中 E1 站位于苏木巴润吉林东部高大沙山的中下部，海拔较该湖高 80 m，地下水埋深较大，受到的干扰因素与不确定性增大，EC 在长时期无降水背景下测定的沙漠蒸发受到限制。

5 初步结论

(1) 巴丹吉林沙漠腹地 2 年的降水观测和沙漠边缘长时间尺度的降水资料分析表明，该沙漠地区降水可划为 3 类：① 小于 5 mm 的常规降水事件 CP，占沙漠地区降水的 90%以上；② 普通年份的最大日降水 OAM，指 20 mm 左右的降水事件，约每 3 年发生 1 次；③ 极端强降水事件 EP，指 40 mm 以上的降水事件，系数十年一遇的现象。

(2) 据位于高大沙山中下部的 EC(拔湖高度 80 m)和降水观测数据分析显示，沙山上的常规降水事件(CP)和普通年份的最大日降水(OAM)皆不能入渗补给地下水，前者在 1~3 d 内可被完全蒸发，后者约 3~4 周可被完全蒸发。数十年一遇的极端强降水事件 EP 后，水分渗入沙层的深度较大，需较长的时间方可蒸发出地表，但亦不会入渗补给对地下水。总之，巴丹吉林沙漠腹地高大沙山上的大气降水对地下水没有显著补给作用。

致谢 兰州大学李育副教授、黄银洲副教授和路俊伟同学在写作过程中予以了有益讨论，在此一并感谢。

参考文献

- 1 Yang X P, Ma N, Dong J F, et al. Recharge to the inter-dune lakes and Holocene climatic changes in the Badain Jaran Desert, western China. *Quat Res*, 2010, 73: 10–19
- 2 王乃昂, 马宁, 陈红宝, 等. 巴丹吉林沙漠腹地降水特征初步分析. *水科学进展*, 2013, 24: 153–160
- 3 Chen J S, Li L, Wang J Y, et al. Groundwater maintains dune landscape. *Nature*, 2004, 432: 459
- 4 Chen J S, Zhao X, Sheng X F, et al. Geochemical information indicating the water recharge to lakes and immovable megadunes in the Badain Jaran Desert. *Acta Geol Sin*, 2005, 79: 540–546
- 5 陈建生, 赵霞, 盛雪芬, 等. 巴丹吉林沙漠湖泊群与沙山形成机理. *科学通报*, 2006, 51: 2789–2796
- 6 顾慰祖, 陈建生, 汪集旸, 等. 巴丹吉林高大沙山表层孔隙水现象的疑义. *水科学进展*, 2004, 15: 695–699
- 7 Yang X P, Williams M A. The ion chemistry of lakes and late Holocene desiccation in the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China. *Catena*, 2003, 51: 45–60
- 8 王涛. 巴丹吉林沙漠形成演变的若干问题. *中国沙漠*, 1990, 10: 29–40
- 9 孙培善, 孙德钦. 内蒙古高原西部水文地质初步研究. 见: 中国治沙队, 编. *治沙研究*(第六号). 北京: 科学出版社, 1964. 245–317
- 10 Jaeckel D. The Badain Jaran Desert: Its origin and development. *Geowissenschaften*, 1996, 14: 272–274
- 11 Jakel D. The importance of dunes for groundwater recharge and storage in China. *Z Geomorphol*, 2002, 126(Suppl): 131–146
- 12 赵景波, 邵天杰, 侯雨乐, 等. 巴丹吉林沙漠高大沙山区沙层含水量与水分来源探讨. *自然资源学报*, 2011, 26: 694–702
- 13 董春雨. 阿拉善沙漠水循环观测实验与湖泊水量平衡. 硕士学位论文. 兰州: 兰州大学, 2011
- 14 朱金峰, 王乃昂, 陈红宝, 等. 基于遥感的巴丹吉林沙漠范围与面积分析. *地理科学进展*, 2010, 29: 1087–1094
- 15 Warner T T. *Desert Meteorology*. Cambridge: Press Syndicate of the University of Cambridge, 2004
- 16 马宁, 王乃昂, 朱金峰, 等. 巴丹吉林沙漠周边地区近 50a 来气候变化. *中国沙漠*, 2011, 31: 1541–1547
- 17 Aubinet M, Grelle A, Ibrom A, et al. Estimates of the annual net carbon and water exchange of European forests: The EUROFLUX methodology. *Adv Ecol Res*, 2000, 30: 113–175
- 18 Dijk A V, Moene A F, DeBruin H A R. *The Principles of Surface Flux Physics: Theory, Practice and Description of the ECPACK Library*. Wageningen: Meteorology and Air Quality Group of Wageningen University, 2004
- 19 Moncrieff J B, Clement R, Finnigan J, et al. Averaging, detrending and filtering of eddy covariance time series. In: Lee X, Massman W J, Law B E, eds. *Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurement*. Dordrecht: Kluwer Academic, 2004. 7–31
- 20 Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quat J Res Meteorol Soc*, 1980, 106: 85–100
- 21 Kljun N, Calanca P, Rotach M W, et al. A simple parameterisation for flux footprint predictions. *Bound-Layer Meteorol*, 2004, 112: 503–523
- 22 Stoy P C, Mauder M, Foken T, et al. A data-driven analysis of energy balance closure across FLUXNET research sites: The role of landscape scale heterogeneity. *Agric For Meteorol*, 2013, 171: 137–152
- 23 Wilson K, Goldstein A, Falge E, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agric For Meteorol*, 2002, 113: 223–243
- 24 马宁. 巴丹吉林沙漠能量分配与湖泊蒸发量的观测研究. 硕士学位论文. 兰州: 兰州大学, 2012
- 25 Oncley S P, Foken T, Vogt R, et al. The energy balance experiment EBEX-2000. Part I: Overview and energy balance. *Bound-Layer Meteorol*, 2007, 123: 1–28
- 26 Liu S M, Xu Z W, Zhu Z L, et al. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China. *J Hydrol*, 2013, 487: 24–38
- 27 Zhao W Z, Liu B. The response of sap flow in shrubs to rainfall pulses in the desert region of China. *Agric For Meteorol*, 2010, 150: 1297–1306
- 28 何清, 向鸣, 李立. 塔克拉玛干沙漠腹地一次强降水天气分析. *干旱区研究*, 1998, 15: 15–20
- 29 Houston J. Variability of precipitation in the Atacama desert: Its cause and hydrological impact. *Int J Climatol*, 2006, 26: 2181–2198
- 30 Jenkinson A F. The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. *Quat J Res Meteorol Soc*, 1955, 81: 158–171
- 31 Justel A, Pena D, Zamar R. A multivariate Kolmogorov-Smirnov test of goodness of fit. *Stat Probabil Lett*, 1997, 35: 251–259
- 32 Zhang Q, Xu C Y, Chen Y D, et al. Extreme value analysis of annual maximum water levels in the Pearl River Delta, China. *Front Earth Sci China*, 2009, 3: 154–163
- 33 Xia J, She D X, Zhang Y Y, et al. Spatio-temporal trend and statistical distribution of extreme precipitation events in Huaihe River Basin during 1960–2009. *J Geogr Sci*, 2012, 22: 195–208

- 34 李江风. 大漠腹地暴雨与积水. 新疆气象, 1990, 13: 47
- 35 Foken T, Wichura B. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agric For Meteorol*, 1996, 78: 83–105
- 36 Baldocchi D D, Falge E, Gu L H, et al. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2001, 82: 2415–2434
- 37 Malhi Y, Pegoraro E, Nobre A D, et al. Energy and water dynamics of a central Amazonian rain forest. *J Geophys Res*, 2002, 107, doi: 10.1029/2001JD000623
- 38 Yang F L, Zhou G S. Characteristics and modeling of evapotranspiration over a temperate desert steppe in Inner Mongolia, China. *J Hydrol*, 2011, 396: 139–147
- 39 Krishnan P, Meyers T P, Scott R L, et al. Energy exchange and evapotranspiration over two semi-arid grasslands in North America. *Agric For Meteorol*, 2012, 153: 31–44
- 40 Kampf S K, Tyler S W, Ortiz C A, et al. Evaporation and land surface energy budget at the Salar de Atacama, Northern Chile. *J Hydrol*, 2005, 310: 236–252
- 41 Unland H E, Houser P R, Shuttleworth W J, et al. Surface flux measurement and modeling at a semi-arid Sonoran Desert site. *Agric For Meteorol*, 1996, 82: 119–153
- 42 Xu X Y, Zhang R D, Xue X Z, et al. Determination of evapotranspiration in the desert area using lysimeters. *Commun Soil Sci Plan*, 1998, 29: 1–13
- 43 原鹏飞, 丁国栋, 王炜炜, 等. 毛乌素沙地降雨入渗和蒸发特征. *中国水土保持科学*, 2008, 6: 23–27
- 44 Chen J S, Liu X Y, Wang C Y, et al. Isotopic constraints on the origin of groundwater in the Ordos Basin of northern China. *Environ Earth Sci*, 2012, 66: 505–517
- 45 Chen J S, Sun X X, Gu W Z, et al. Isotopic and hydrochemical data to restrict the origin of the groundwater in the Badain Jaran Desert, Northern China. *Geochem Int*, 2012, 50: 455–465
- 46 张光辉, 聂振龙, 王金哲, 等. 黑河流域水循环过程中地下水同位素特征及补给效应. *地球科学进展*, 2005, 20: 511–519
- 47 张永明, 胡顺军, 翟禄新, 等. 塔里木盆地裸地潜水蒸发计算模型. *农业工程学报*, 2009, 25: 27–32

《科学通报》(Chinese Science Bulletin) 征稿简则

《科学通报》(Chinese Science Bulletin) 创刊于 1950 年, 是中国科学院和国家自然科学基金委员会共同主办、《中国科学》杂志社出版的自然科学综合性学术刊物。《科学通报》致力于快速报道自然科学各学科基础理论和应用研究的最新研究动态、消息、进展, 点评研究动态和学科发展趋势, 要求文章的可读性强, 能在比较宽泛的学术领域产生深刻的影响。2010 年起《科学通报》改为旬刊, 每月 10 日、20 日、30 日(2 月最后一天)出版。

《科学通报》是《中国科技论文与引文数据库》和《中国科学引文数据库》的源期刊, 被《中国期刊全文数据库》收录, 并进入《中文核心期刊要目总览》。

《科学通报》的英文版 *Chinese Science Bulletin* 是 SCI 核心期刊, 同时被 Academic Search Complete, Chemical Abstracts, Current Contents, Environmental Engineering Abstracts, Environmental Sciences and Pollution Management, Inspec, Pollution Abstracts, Water Resources Abstracts, Zoological Record 等国际著名检索系统和数据库收录。

1. 《科学通报》设有以下主要栏目:

(1) 评述类

点评: 评介近期在国内外重要刊物上发表的重要研究成果, 以及国家级各重要科技奖项的研究成果等(1~2 个印刷面)。

进展: 评介当前迅速发展的某个研究领域或方向的突出进展, 归纳总结该领域近 2~3 年取得的重要成果(3~4 个印刷面)。

评述: 综述某一重要研究领域的代表性成果, 评论研究现状, 提出今后研究方向的建议(6~8 个印刷面)。

前沿: 评述当前活跃的、迅速发展的学科领域的研究现状、进展和存在问题, 对未来研究提出有洞察力的设想。本栏目以约稿为主。

(2) 论文类

快讯: 迅速、简要地报道具创新性和新颖性的科研成果(不超过 3 个印刷面)。

论文: 报道具创新性、高水平 and 重要科学意义的最新科研成果(不超过 7 个印刷面)。

(3) 讨论类

论坛: 对重要科学问题、科研管理政策或国家重大科技规划发表评论(不超过 4 个印刷面)。

争鸣: 就《科学通报》发表的文章进行讨论和答辩, 或就当前科学研究中的某个有争议的热点问题予以评论(不超过 3 个印刷面)。

(4) 消息类

简报: 简要介绍发表在《科学通报》英文版(*Chinese Science Bulletin*)上的论文及快讯文章的主要内容(1 个印刷面)。

动态: 报道重大科技新闻、科研信息、我国科学界重要的学术活动以及在我国举办的重要国际学术会议(0.5 个印刷面)。

书评: 评介国内外近期出版的高水平、高质量的自然科学学术论著(1 个印刷面)。

2. 请使用在线方式投稿: 访问本刊网站 csb.scichina.com, 进入“作者投稿系统”。首次投稿时需注册一个“作者账户”, 注册完成之后, 按照提示与引导将稿件上传到数据库服务器。

3. 稿件的取舍将由本刊编委会决定, 评审过程大约需要 30~60 天。评审结束后, 无论录用与否, 编辑部将及时向作者转达评审意见。作者若在 60 天内没有收到编辑部有关稿件的取舍意见, 请及时与编辑部联系。作者在通知编辑部后, 可以改投他刊。本刊不受理“一稿多投”之稿件。

4. 稿件被录用后, 全体作者必须签署“著作权转让声明书”, 将该论文(各种语言版本)的复制权、发行权、信息网络传播权、翻译权、汇编权在全世界范围内转让给《科学通报》的出版单位《中国科学》杂志社。全体著作权人授权《中国科学》杂志社根据实际需要独家代理申请上述作品的各种语言版本(包含各种介质)的版权登记事项。

5. 详细的投稿指南请见《中国科学》杂志社网站《科学通报》主页。

科学通报

CHINESE SCIENCE BULLETIN

第 59 卷 第 7 期 2014 年 3 月 10 日出版

(版权所有, 未经许可, 不得转载)

主管	中国科学院	出版	《中国科学》杂志社
编辑	中国科学院 《科学通报》编辑委员会	印刷装订	北京(100717)东黄城根北街 16 号
	北京(100717)东黄城根北街 16 号	总发行处	北京艺堂印刷有限公司
总主编	朱作言	订购处	北京报刊发行局
			全国各邮电局
			《中国科学》杂志社发行部

刊号: ISSN 0023-074X 代号: 国外 TM41
CN 11-1784/N 国内邮发 80-213

每期定价: 120.00 元 全年定价: 4320.00 元

广告经营许可证: 京东工商广字第 0429 号

SCIENCE CHINA
CHINESE SCIENCE BULLETIN
WWW.SCI.CHINA.COM
SCIENCE CHINA PRESS

■ 在线投稿、审稿，方便快捷，请登录

<http://csb.scichina.com> **DOWNLOAD**

科学通报

Chinese Science Bulletin

- 中文期刊被《中国科技论文与引文数据库》、《中国科学引文数据库》和《中文核心期刊要目总览》等检索系统收录。
- 英文期刊被SCI、CA、SCOPUS等检索系统收录。

● 每10天出版一期

● 重视交叉科学领域

● 提前在线出版 (Online First)

● 稿件审理公正快速

● 编辑加工严格规范

● 出版服务专业周到

主管：中国科学院
主办：中国科学院 国家自然科学基金委员会

