

古尔班通古特沙漠南部沙面稳定性研究*

王雪芹 ** 王 涛 蒋 进 赵从举

① 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000;

② 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘要 沙垄是世界沙海中分布最广的沙丘类型, 但涉及沙面稳定性的综合研究却不多见. 古尔班通古特沙漠南部主要由梁窝状沙垄组成, 总面积的 80% 以上为固定、半固定状态. 对区域气候条件、土壤状况和植物分布等进行综合研究, 并对沙面活动进行系统监测, 表明沙漠南部处于复合型低能风环境中, 冬季积雪和冻土可对地表形成有利的保护. 水热配置是沙漠植物、特别是短命植物生长的良好气候条件. 起沙风集中于 4、5 和 6 月份, 正与地表湿润、植物广泛发育的时间相对应, 有效的植被覆盖是沙面整体处于稳定的重要因素. 活动区域仅存在于沙垄顶部和两坡上部, 沙面总体活动值与输沙势在季节变化上具相对一致的变化趋势, 垄间和两坡中下部稳定少变.

关键词 古尔班通古特沙漠南部 沙垄 沙面稳定性

沙垄又称线形沙丘, 是世界沙海中分布最广的沙丘类型, 约占风成地貌总面积的 1/2~1/3, 主要分布于非洲南部、阿拉伯半岛、澳大利亚、中亚和北非-中东地区^[1], 在中国大面积存在于古尔班通古特沙漠. 长期以来, 国外不少学者从风动力和环境条件等方面就沙面稳定性作了大量工作^[2~9], 但综合性研究并不多见.

古尔班通古特沙漠是中国最大的固定、半固定沙漠, 主体面积的 80% 以上处于稳定状态. 如果说降水多寡所决定的植被覆盖是沙面稳定的重要因素, 那么在 100 mm 左右的类似降水条件下, 国内其它沙漠流动性明显高于古尔班通古特沙漠. 为此, 国内许多学

者从不同的角度对其进行探讨, 主要有植被稳定、粗粒稳定、悬湿沙层和气候稳定等观点^[10~14], 但一直缺乏沙面活动过程与气候及植被、土壤等下垫面条件相结合的系统观测与研究. 随着沙漠中重大建设工程项目的持续展开, 人类活动对原始地表的扰动和稳定性恢复等问题已引起人们的广泛关注^[15], 迫切需要对原始沙面稳定机理进行系统深入的研究和探讨. 为此, 作者从风动力和影响沙面活动的下垫面因素入手, 综合分析区域风况和水热组合, 测定沙丘表面的物质组成, 并对土壤水分、植物分布和沙垄表面活动性等进行系统监测, 以期对沙面的稳定性机制进行探讨.

2003-09-08 收稿, 2003-12-22 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(编号: G1999043504)、中国科学院知识创新工程项目(编号: KZCX3-SW-326)和中国科学院“西部之光”人才培养计划共同资助

** E-mail: xqwang@ms.xjb.ac.cn

1 区域概况与研究方法

1.1 区域概况

古尔班通古特沙漠位于准噶尔盆地腹地(44°11'~46°20' N, 84°31'~90°00' E), 面积达 48800 km², 占全国沙漠总面积的 6.8%, 是中国第二大沙漠, 也是西部干旱区唯一以固定与半固定线形沙丘为主的沙漠. 主要沙丘类型为梁窝状和树枝状沙垄, 长度数百米到 10 km 多不等, 近南北走向. 沙垄高度 10~50 m, 顶部普遍存在 10~40 m 宽度不等的流动带^[16](图 1). 该沙漠 ≥10℃ 年积温为 3000~3500℃, 年降水量 70~150 mm, 年蒸发量 2000 mm 以上, 冬季有 20 cm 厚的稳定积雪, 为典型的内陆干旱气候. 本区降水过程在很大程度上受西风环流的影响^[17], 其季节分配以春夏季略高于秋冬季, 其中 4~7 月份的降水量占全年的 47.6%. 白梭梭 (*Haloxylon persicum*) 为优势种, 占据沙丘中上部, 丘间低地和沙丘中下部为蛇麻黄群落 (*Ephedra ditachya*), 其下普遍存在短命植物和一层黑色的生物结皮.

1.2 研究方法

区域风况数据取自沙漠南缘中国科学院阜康生态站 2002 年 1 h 风向风速的连续观测记录, 起沙风确定为 6 m · s⁻¹ (10 m 高)^[18]. 用 Fryberger 的方法计算输沙势^[19]. 沙面活动性和土壤、植被等的系统监测, 于

2002 年 3 月~2003 年 2 月在垂直于沙垄走向断面上进行. 观测沙垄(44° 32' 30" N, 88° 6' 42" E)走向 NW18°, 高度 23 m, 垄间距 210 m, 顶部呈穹状, 西坡较东坡缓. 7 个植物长期监测样方位于监测断面的不同地貌部位, 10 m × 10 m 大小样方为乔灌木调查, 内设 3 个 1 m × 1 m 小样方为草本植物调查. 每隔 15~20 d 调查物种数量、植物高度、冠幅和植被覆盖度等. 土壤水分监测与植物调查同期进行, 采用断面法铝盒取样, 室内 105℃ 烘干称重后计算土壤重量含水率. 沙面活动性采用地形测量和插钎法, 将 25 根铁钎均匀分布于观测断面上, 每场起沙风后即进行蚀积测量, 用 Giles 方法计算相应时段的总体沙面活动值(用日均沙面变化量反映, 单位为 mm · day⁻¹)^[20], 以进行时空变化的比较.

2 结果与讨论

2.1 气候环境背景

研究区年输沙风能为 21.92 VU, 合成输沙方向为南偏东 23.02°, 方向变率达 0.26, 在区域风能分类中属复合型低能风况. 其中, 西南风能占 35.1%, 以 WSW 和 SW 方向风为主; 东北风能占 32.9%, 以 ENE 和 NE 方向风为主; 西北风能占 22.3%, 以 N 和 NNW 方向风为主. 在季节变化上, 3~6 月份为主要风季, 输沙势占全年总量的 69.1%, 其中以 ENE 风最大, WSW



图 1 古尔班通古特沙漠沙垄顶部的流动带

和 SW 风次之, 合成输沙方向为南偏东 29.93°。7~10 月份占全年总输沙势的 27.84%, 以 ENE 风最大, 其次是 N 和 WSW 风, 合成输沙方向为南偏东 15.61°。11~2 月份, 以 ENE 风占绝对优势, 合成输沙方向为南偏西 64.22°。由此可以认为, 沙漠南部沙垄发育在复合型低能风环境中, 其中两个主要风向均与主梁走向呈较大角度相交。

魏文寿^[21]在对古尔班通古特沙漠气候变化的研究中发现, 热量过程与湿润条件至关重要, 风速的影响亦不可忽视。Lancaster 等人^[22,23]使用气候指数对沙丘活动性进行了理论探讨, 并通过实际观测输沙率证实了气候指数判定沙面活动的可行性, 认为沙面活动不仅取决于输沙风能, 同时取决于降水和蒸发的对比。研究区起沙风主要集中于 3~6 月份, 正值积雪融化、春雨增加和气温转暖同步(图 2), 是植物生长发育和沙面处于稳定状态的良好气候条件。

2.2 土壤状况

大范围来看, 古尔班通古特沙漠主要由中沙和细沙组成^[24], 对研究区沙垄表层土壤分析结果表明: 沙垄顶部以中沙和细沙为主, 两粒级含量分别占 55.28% 和 41.28%, 分选性好(标准离差为 0.38), 土壤剖面分异不明显; 垄间低地为混合沙, 中沙、细沙、极细沙和粉沙含量分别为 26.22%, 39.08%, 30.16% 和 4.42%, 分选性较差(标准离差为 0.78), 地表有机质有微弱积累。沙物质的粒度特征对风蚀可蚀性的影响是通过改变起动风速来实现的, 易蚀颗粒介于 0.075~0.4 mm 间,

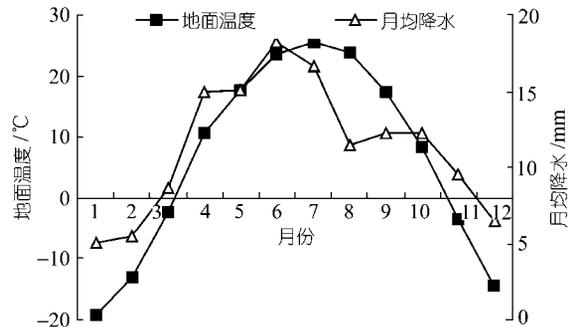


图 2 古尔班通古特沙漠南部水热配置

此范围内起动风速随平均粒径的增大而增大^[25]。由此看来, 该沙漠的物质组成较塔克拉玛干沙漠粗^[10], 应有较大的起沙风速, 但仍属于风力有效作用的粒径范围。

观测结果显示, 春季垄间土壤水分含量最高, 夏秋季最少(图 3), 冬季则处于冻结滞水状态。春季积雪融化和降雨所影响的深度主要集中于地表 30 cm 的范围, 持续时间不超过 60 d, 这是研究区短命植物广泛发育的关键所在。夏秋季季节的一次性降水往往小于 5 mm, 仅能湿润不到 10 cm 的地表(如 8 月 27 日的观测结果), 且很快蒸发。4 月中上旬, 沙垄顶部表层 30 cm 平均含水率为 3.47%, 而垄间为 4.92%; 4 月下旬, 垄间和两坡仍维持在 4% 以上, 而垄顶部下降至 2.01%。5 月中旬, 两坡中下部和垄间下降至 2% 左右, 垄顶依然保持在 2.56%, 两坡上部在 3.52%~4.01%; 5 月下旬, 两坡中上部下降至 1.9% 左右, 而垄顶维持在 2.45%。6 月中旬~10 月, 表层土壤水分均在 0.45%~0.65% 之间, 空

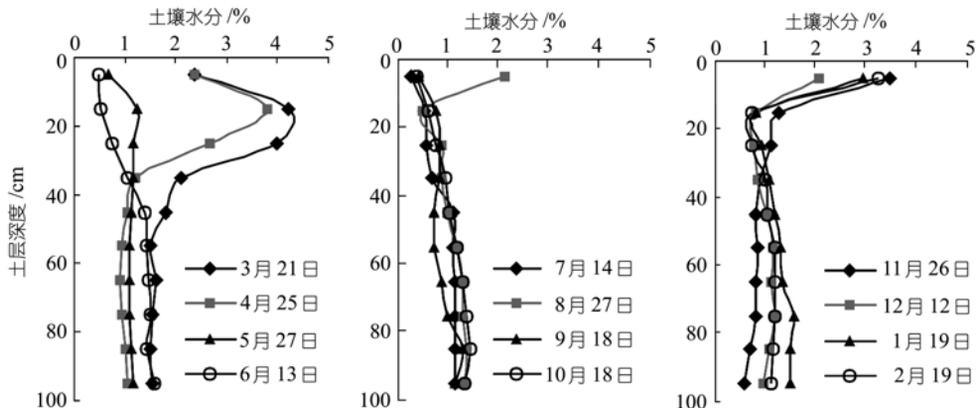


图 3 古尔班通古特沙漠南部垄间土壤水分的季节变化

间变化不明显(图 4)。

土壤水分对起动风速影响的物理机制在于通过水分增加沙物质间的粘聚力, 最终达到减少起沙数量和强度的目的^[26]。风洞实验结果表明¹⁾, 该沙漠沙物质含水率在 1.10% 时, 起动风速为 $11.47 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 当含水率达到 3.09% 时为 $16.88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。3 月底, 积雪融化后沙物质暴露于地表, 但起沙风平均风速仅为 $7.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大风速不超过 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 不足以造成地表沙粒起动。可见, 在植物分布尚不足以保护地表的 3, 4 月份, 表层土壤水分是沙面处于相对稳定的重要因素。

2.3 植物分布

研究区总计有 45 种植物, 其中小乔木 1 种, 灌木和小半灌木 4 种, 长营养期草本植物 11 种, 短命和类短命植物 29 种^[27]。垄间和两坡中下部约占沙垄表面积的 60%, 蛇麻黄等小半灌木平均盖度为 8.9%~10.0%, 短命植物在 5 月中旬可达到 51.8%; 两坡上部约占沙垄表面积的 25%~30%, 以白梭梭为优势种的乔灌木盖度为 12.2%~21.4%, 而短命植物在 5 月中下旬可达到 38.2%; 垄顶部为活动性最强的区域, 约占沙垄表面积的 10%~15%, 沙拐枣和沙蒿等灌木盖度变化于 1.7%~4.8% 之间, 三芒草等长营养期草本植物不超过 7.1%。

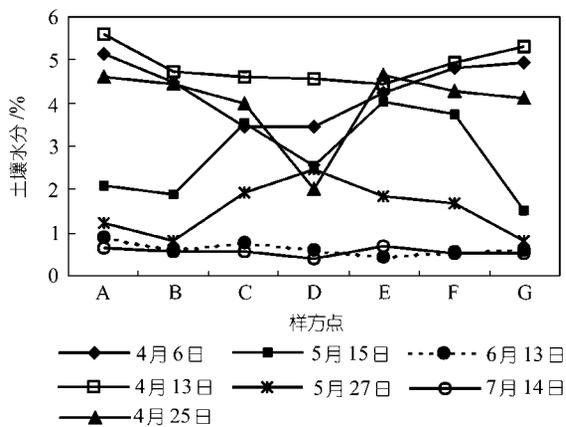


图 4 沙垄表层 30 cm 土壤水分的时空分布

A 示西侧垄间; B 示西坡中下部; C 示西坡上部; D 示沙垄顶部;
E 示东坡上部; F 示东坡中部; G 示东侧垄间

3 月底~4 月初短命植物相继萌动出土, 4 月上旬除沙垄顶部的大部分区域平均盖度可达到 5.3%, 植株高度 3 cm 以下; 4 月下旬即达到 20.8%, 植株高度 10 cm 左右; 5 月中旬为 40.2%, 植株高度在 20 cm 左右, 这是垄间土壤水分迅速下降的重要原因; 6 月中旬大部分短命植物开始衰退, 平均盖度在 14.1%; 6 月底~7 月初所有短命植物枯萎死亡。长营养期草本植物于春季萌发, 较短命植物推后一到两个月完成生活周期, 但地面覆盖度不超过 7.1%, 乔灌木覆盖则无明显的季节变化。由此看来, 短命植物季相变化最为明显, 在风沙活动频繁期以绝对的优势占据群落下层, 基本上控制了大部分沙垄表面植被盖度的总体走势(图 5)。

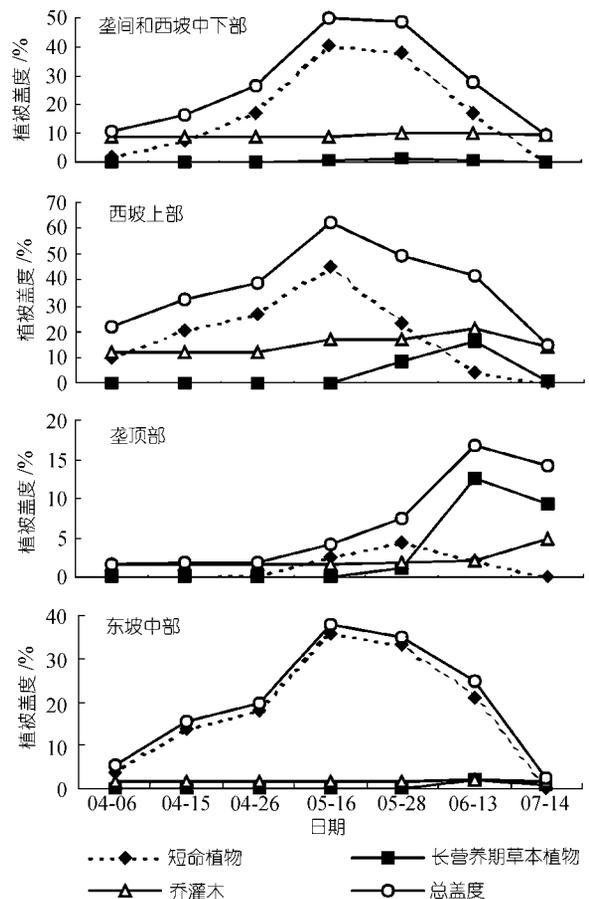


图 5 古尔班通古特沙漠南部植物群落结构及时间变化

1) 雷加强, 王雪芹, 李丙文, 等. 古尔班通古特沙漠风沙活动特征研究报告, 1996. 38~41

植被的存在可有效抑制风蚀和减小沙面活动^[28-31], 其作用主要取决于盖度, 其次是高度和宽度^[32]. 风洞实验发现, 30%的植被盖度可大幅度减弱风蚀, 当达到 35%~40%时, 几乎没有风蚀^[33]. 相同覆盖条件下, 均匀分布较丛状分布可产生较大的粗糙度^[34]. Giles 等人^[20]在对卡拉哈里沙漠线形沙丘沙面活动性和植被覆盖的关系研究中发现, 植被盖度高于 14%时, 沙面活动系数趋于稳定. 对于研究区沙垄表面, 大部分区域乔灌木和长营养期草本植物盖度不足 10%, 而短命植物均匀分布, 在风季形成大于 14%的覆盖度, 特别是以大于 40%的盖度对应着风沙活动最强的 5 月, 是古尔班通古特沙漠植被稳定沙面的重要贡献者.

2.4 沙面活动性监测

观测期内, 7~23 号铁钎所在地貌部位发生了沙面变化, 其中以 14~18 号变化最大(图 6), 说明沙面活动区域主要集中于沙垄顶部和上部. 垄顶总体沙面活动值变化于 $0.43\sim 0.54\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 相当于全年风蚀和风积累积量为 $90\sim 110\text{ mm}$; 其次为两坡上部, 沙面总体活动值为 $0.09\sim 0.18\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 相当于 $20\sim 50\text{ mm}$ 的累积值. 观测到一次性最大风蚀深度为 49 mm , 最大风积厚度 85 mm , 均出现于 5 月中旬. 13 号铁钎处出现了沙面活动的低值($0.07\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$), 和该区域集中分布的白梭梭有关, 垄间和两坡下部未观测到沙面变化. 对 7~23 号铁钎进行相应时段的平均处理后, 看出沙面变化以春

季最大(5 月份为 $0.44\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$)、秋季次之(9 月份为 $0.21\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$)、夏季较小(7 月份为 $0.06\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$)、冬季不变, 与输沙势在季节变化上呈现相对一致的变化趋势(图 7). 所不同的是, 3 月份已进入风季, 输沙势达到 3.60 VU , 但总体沙面活动值却为 $0\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 和表层土壤水分高密切相关; 6 月份风力依然保持在 3~4 月份的强度上, 但沙面活动值开始大幅下降, 广泛分布的短命植物起到了重要的作用; 冬季沙面无变化, 风力弱和冻土积雪保护地表是两个关键性因素.

3 结论

(1) 古尔班通古特沙漠南部固定、半固定沙垄存在于复合型低能风环境中, 其中主要风向均与主梁走向呈大角度相交. 虽然降水量少于 150 mm , 但冬季 20 cm 厚的稳定积雪和较多的春雨, 为早春植物的生长发育提供了良好条件. 低风能和水热配置一致, 使沙面整体处于稳定的气候环境背景.

(2) 沙垄表面的物质组成以中沙和细沙为主, 属于风力有效作用的粒径范围. 冬季风力弱, 积雪和冻土能够对地表形成有利的保护. 3 月下旬风季来临, 但土壤表层平均含水率达到 3.5%以上, 能有效抑制沙面活动.

(3) 4~6 月份是古尔班通古特沙漠风沙活动的频繁期, 输沙势占全年的 60%以上. 此时正与良好的植被覆盖相对应, 特别是早春短命植物形成了明显的层片, 85%左右的沙垄表面在 4, 5 和 6 月份平均盖度依次

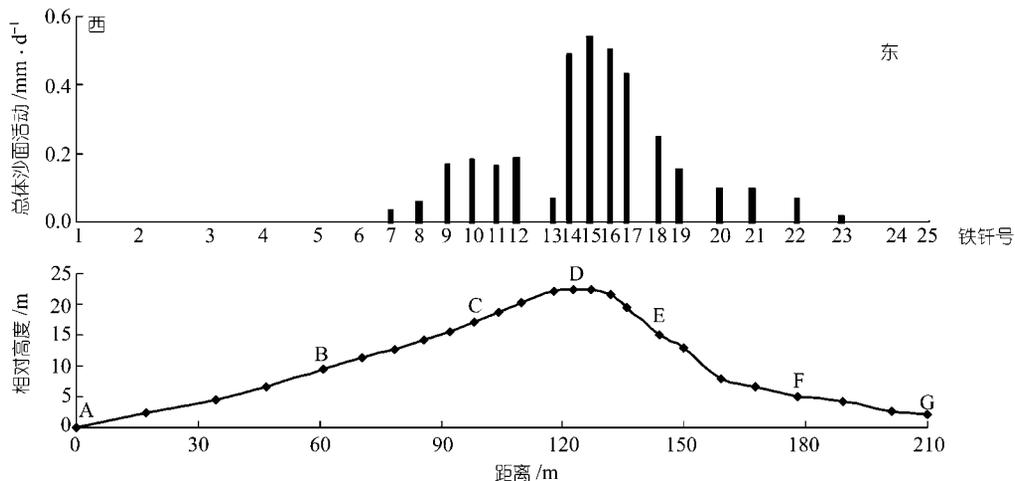


图 6 研究断面总体沙面活动图示
图例说明同图 4

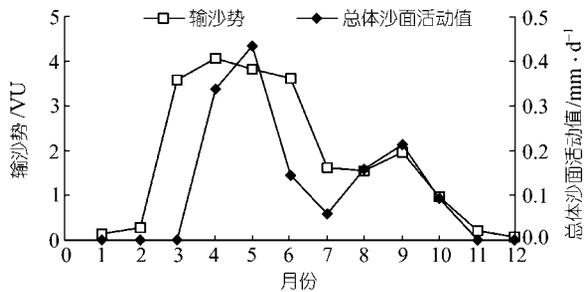


图 7 沙垄活动区域总体沙面活动值与输沙势的季节分布

为 13.9%, 40.2% 和 14.1%, 乔灌木和长营养期草本植物不足 10%, 因此短命植物是该区域植被稳定沙面的重要贡献者。

(4) 系统监测表明沙面整体较为稳定, 仅在垄顶和两坡上部存在一定的活动性, 但沙面变化累积值不超过 110 mm, 垄间和两坡中下部稳定不变。观测期内, 沙面活动与输沙势在时间变化上有较强的一致性, 可见就沙丘中上部而言, 其活动性受风力影响较大。

致谢 雷加强研究员主持并对研究工作进行了整体安排。参加野外工作的还有钱亦兵、王鲁海、陈文海、陈均杰和宋春武等人。李彦博士和周兴佳研究员阅读全文并提出宝贵的修改意见。张立运研究员和张伟民、张元明、韩致文 3 位博士给予作者热情的鼓励和帮助, 在此一并对他们表示衷心感谢。

参 考 文 献

- Lancaster N. Linear dunes. *Progress in Physical Geography*, 1982, 6(4): 475-504
- Lancaster N. Variations in wind velocity and sand transport on the windward flanks of desert sand dunes. *Sedimentology*, 1985, 32: 581-593
- Lancaster N, Baas A. Influence of vegetation cover on sand transport by wind: Field studies at Owens Lake, California. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1998, 23(1): 69-82[DOI]
- Bullard J E, Thomas D S G, Livingstone I, et al. Wind energy variation in the southwestern Kalahari Desert and implications for linear dune-field activity. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21(3): 263-278[DOI]
- Bullard J E, Thomas D S G, Livingstone I, et al. Dune field activity and interactions with climatic variability in the southwestern Kalahari Desert. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1997, 22: 165-174[DOI]
- Giles F S, Livingstone I, David S G, et al. Airflow and roughness characteristics over partially vegetated linear dunes in the southwest Kalahari Desert. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21: 19-34[DOI]
- Livingstone I. Monitoring surface change on a Namib linear dune. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1989, 14: 31-332
- Pandey A N, Rokad M V. Sand dune stabilization: An investigation in the Thar Desert of India. *Journal of Arid Environment*, 1992, 22(3): 287-292
- Tsoar H. Profiles analysis of sand dunes and their steady state significance. *Geografiska Annaler*, 1985, A67(1-2): 47-59
- 朱震达, 吴正, 刘恕, 等. 中国沙漠概论. 北京: 科学出版社, 1980. 29-326
- 胡适之, 芦云亭, 吴正, 等. 新疆准噶尔盆地沙漠考察. 治沙研究(第 3 号). 北京: 科学出版社, 1962. 43-64
- 陈治平. 准噶尔盆地古尔班通古特沙漠的基本特征. 见: 中国科学院地理研究所主编. 地理集刊(第 5 号). 北京: 科学出版社, 1963. 79-90
- 季方, 叶玮, 魏文寿. 古尔班通古特沙漠固定与半固定沙丘形成原因初探. *干旱区地理*, 2000, 23(1): 32-35
- 郑度. 准噶尔沙漠植被与环境的关系. 中国科学院治沙队第一次学术报告会文集(自然地理). 北京: 科学出版社, 1962. 327-341
- Qian Y B, Zhang L Y, Wu Z N, et al. Damage and recovery of the Gurbantunggut Desert vegetation following engineering activities. *Science in China (Series D)*, 2002, 45(Supp.): 78-86[摘要] [PDF]
- 王雪芹, 雷加强. 古尔班通古特沙漠半固定沙垄沙面的蚀积特征. *干旱区研究*, 1998, 15(1): 35-39
- 方小敏, 吕连清, 杨胜利, 等. 昆仑山黄土与中国西部沙漠发育和高原隆升. *中国科学, D 辑*, 2001, 31(3): 177-184[摘要] [PDF]
- 吴正. 中国沙漠与海岸沙丘研究. 北京: 科学出版社, 1997. 29-43
- Fryberger S G. Dune form and wind regime. In: Mckee E D, ed. *A Study of Global Sand Seas*. Washington: US Government Printing Office, 1979. 137-170
- Giles F S, David S G, Joanna E, et al. Dune mobility and vegetation cover in the southwest Kalahari Desert. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1995, 20(6): 515-529
- 魏文寿. 现代沙漠对气候变化的响应与反馈: 以古尔班通古特沙漠为例. *科学通报*, 2000, 45(6): 636-641[摘要] [PDF]
- Lancaster N. Development of linear dunes in the southwest Kalahari, southern Africa. *Journal of Arid Environments*, 1988, 14: 233-244
- Lancaster N, Paula H. A test of climate index of dune mobility using measurement from south-western United State. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000, 25(2): 197-207[DOI]
- Qian Y B, Zhou X J, Wu Z N, et al. Multi-sources of desert sands for the Jungger Basin. *Journal of Arid Environments*, 2003, 53: 241-256[DOI]
- 董治宝, 李振山. 风成沙粒度特征对其风蚀可蚀性的影响. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(4): 1-5
- 贺大良, 申建友. 降水对起沙风速的影响. *中国沙漠*, 1988, 8(4): 18-26
- 王雪芹, 蒋进, 雷加强, 等. 古尔班通古特沙漠短命植物分布及其沙面稳定意义. *地理学报*, 2003, 58(4): 598-605
- Lee J A. The role of desert shrub size and spacing on wind profile parameters. *Physical Geography*, 1990, 12: 72-89
- Wolf S A, Nickling W G. The protective role of sparse vegetation in wind erosion. *Progress in Physical Geography*, 1993, 17(1): 50-68
- 刘小平, 董治宝. 直立植被粗糙度和阻力分解的风洞实验研究. *中国沙漠*, 2002, 22(1): 82-87
- 董治宝, Donald W, 高尚玉. 直立植物防沙措施粗糙特征的模拟实验. *中国沙漠*, 2000, 20(3): 260-263
- Bressolier C, Yves F T. Studies on wind plant interactions on French Atlantic coastal dunes. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1979, 47(1): 331-338
- Wasson R J, Nanninga P M. Estimating wind transport of sand on vegetated surface. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1986, 11: 505-514
- 董治宝, 陈渭南, 董光荣. 植被对风沙土风蚀作用的影响. *环境科学学报*, 1996, 16(4): 437