

塔克拉玛干沙漠风沙土潜水极限蒸发强度的理论分析

胡顺军^{①②}, 雷加强^①, 徐新文^①, 宋郁东^①, 田长彦^{①②}, 陈小兵^③

① 中国科学院绿洲生态与荒漠环境重点实验室, 乌鲁木齐 830011;

② 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011;

③ 中国科学院烟台海岸带可持续发展研究所, 烟台 264003

E-mail: xjhushunjun@yahoo.com.cn

2007-09-02 收稿, 2008-06-02 接受

中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号: KZCX3-SW-342)、国家自然科学基金项目(批准号: 40771043, 40471020)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号: KZCX2-XB2-03)和新疆维吾尔自治区科技攻关重大专项(批准号: 200731137-3)资助

摘要 潜水蒸发是塔克拉玛干沙漠地区浅层地下水的主要消耗项. 潜水极限蒸发强度是在给定的土壤和潜水埋深条件下单位时间内土壤最大可能输送到地表的水量, 是建立潜水蒸发计算模型的重要参数和控制条件. 利用实测的土壤含水率和土壤水吸力数据, 根据 Van Genuchten 提出的水分特征曲线公式, 采用最小二乘法拟合了塔克拉玛干沙漠地区土壤的水分特征曲线方程. 采用瞬时剖面法现场测定了非饱和土壤导水率, 建立了该区非饱和土壤导水率的计算公式. 在对非饱和土壤导水率的计算公式进行概化的基础上, 根据非饱和土壤水稳定流理论, 推导出计算潜水极限蒸发强度的准解析解. 研究表明: 采用 Van Genuchten 提出的水分特征曲线公式描述塔克拉玛干沙漠地区土壤水分特性, 效果较好; 潜水极限蒸发强度随潜水埋深的增大而呈幂函数关系递减.

关键词

塔克拉玛干沙漠
风沙土
潜水极限蒸发强度
稳定流
非饱和土壤导水率

潜水蒸发是指潜水向包气带输送水分, 并通过土面蒸发和作物蒸腾进入大气的过程. 多年来包括土壤物理、水文地质、农田水利、地表水文及水资源等学科在内的许多专家学者都对潜水蒸发的机理与规律作了大量的研究工作^[1~11]. 对于给定的土壤和潜水埋深, 潜水蒸发强度随着大气蒸发力的增大而增加, 当大气蒸发力趋于无穷大时, 潜水蒸发强度将趋近于极限蒸发强度. 潜水极限蒸发强度就是在给定的土壤和潜水埋深条件下单位时间内土壤最大可能输送到地表的水量, 也被称为潜水最大可能蒸发强度^[12~15], 它是建立潜水蒸发计算模型的重要参数和控制条件^[15]. 目前确定潜水蒸发极限强度的主要方法有图解法(又称为适线法)、非线性回归迭代法、理论分析法等. Gardner^[1]、贝弗尔等人^[16]、高文仲^[17]、Jury 等人^[18]、张蔚榛^[19,20]、郭元裕^[21]、唐海行等人^[8]、马英杰等人^[22]研究了潜水极限蒸发强度的解析解, 史文娟等人^[23]分析了盐分对潜水极限蒸发强度的影响. 研究潜水极限蒸发强度的解析解, 可使潜水蒸发

计算模型建立在坚实可靠的理论基础之上, 在水资源评价、水均衡分析、盐碱土治理、灌区改造及生态需水量计算等方面都具有十分重要的意义^[24~30].

1 实验区概况

实验区位于塔克拉玛干沙漠腹地, 年平均气温 12.4℃, 月平均气温一年中最热月为 7 月, 月平均气温 28.2℃, 最冷月为 12 月, 月平均气温 -8.1℃. 年平均降水量 11.05 mm, 降水年内分布不均匀, 主要集中在 5~8 月, 其降水量占全年降水量的 92.3%. 年水面蒸发量 3638.6 mm(口径 20 cm 小型蒸发皿观测值), 月平均水面蒸发量最大值出现在 6 月份, 其值为 563.2 mm; 月平均水面蒸发量最小值出现在 12 月份, 其值为 34.4 mm. 年日照时数为 2571.3 h, 月平均日照时数最大值出现在 10 月份, 其值为 8.3 h; 月平均日照时数最小值出现在 1 月份, 其值为 5.2 h. 年平均相对湿度 29.4%, 月平均相对湿度最大值出现在 1 月份, 其值为 46%; 月平均相对湿度最小值出现在 4 月

份, 其值为 15.5%. 年平均风速 $2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 最大瞬时风速 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 风向以东偏北为主^[31]. 地下水埋深差异较大, 复合沙垄顶部的地下水埋深大于 60 m, 而在垄间只有 3~8 m, 个别低地只有 1 m 左右. 浅层地下水全部为咸水, 井水的矿化度一般在 $45 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. 土壤为流动风沙土, 土层深厚. 由于经过了充分的风力分选作用, 土壤机械组成以 $0.25\sim 0.05 \text{ mm}$ 颗粒占 70%~80%以上, 粗沙、粉沙和黏粒含量较少. 土壤剖面干容重在 $1.49\sim 1.51 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 间. 土壤饱和含水率为 $0.43 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ ^[31~33].

2 潜水蒸发极限强度的理论分析

均质土壤稳定蒸发时的含水率及吸力分布如图 1 所示. 定水位条件下均质土壤稳定蒸发的定解问题为^[12]

$$\begin{cases} E = K(S) \frac{dS}{dZ} - K(S), \\ S(0) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

式中, Z 为垂直坐标(m), $K(S)$ 为非饱和土壤导水率(mm/d); S 为土壤水吸力(m). 若非饱和导水率采用一般的形式

$$K(S) = \frac{K_s}{1 + fS^N}, \quad (2)$$

式中, K_s 为饱和导水率(mm/d).

$$E = \frac{K_s}{1 + fS^N} \left(\frac{dS}{dZ} - 1 \right),$$

$$dZ = \frac{1}{1 + \frac{E}{K_s} + \frac{E}{K_s} fS^N} dS,$$

当 $Z=0$ 时, $S=0$; 当 $Z=H$, $S\rightarrow\infty$ 时, $E\rightarrow$ 潜水极限蒸发强度 E_{\max} .

$$\int_0^H dZ = \int_0^\infty \frac{1}{1 + \frac{E_{\max}}{K_s} + \frac{E_{\max}}{K_s} fS^N} dS, \quad (3)$$

当 $E_{\max} \ll K_s$ 时, 则有

$$H = \int_0^\infty \frac{1}{1 + \frac{fE_{\max}}{K_s} S^N} dS. \quad (4)$$

设 $\frac{fE_{\max}}{K_s} S^N = y^N$, 则有

$$S = \left(\frac{K_s}{fE_{\max}} \right)^{\frac{1}{N}} y,$$

$$dS = \left(\frac{K_s}{fE_{\max}} \right)^{\frac{1}{N}} dy.$$

当 $S\rightarrow 0$ 时, $y\rightarrow 0$; $S\rightarrow\infty$ 时 $y\rightarrow\infty$,

故

$$H = \int_0^\infty \frac{1}{1 + y^N} \left(\frac{K_s}{fE_{\max}} \right)^{\frac{1}{N}} dy = \left(\frac{K_s}{fE_{\max}} \right)^{\frac{1}{N}} \int_0^\infty \frac{1}{1 + y^N} dy,$$

又因为

$$\int_0^\infty \frac{1}{1 + y^N} dy = \frac{\pi}{N \sin\left(\frac{\pi}{N}\right)},$$

所以

$$H = \left(\frac{K_s}{fE_{\max}} \right)^{\frac{1}{N}} \cdot \frac{\pi}{N \sin\left(\frac{\pi}{N}\right)},$$

$$E_{\max} = \frac{K_s}{f} \left[\frac{\pi}{HN \sin\left(\frac{\pi}{N}\right)} \right]^N. \quad (5)$$

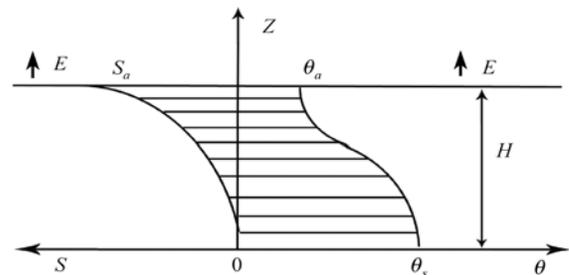


图 1 稳定蒸发条件下土壤水分和吸力分布

3 塔克拉玛干沙漠风沙土土壤水分运动参数

3.1 土壤水分特征曲线

文献[34,35]提出的土壤水分特征曲线的公式为

$$\theta(S) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha S)^n]^m}, m = 1 - \frac{1}{n}, \quad (6)$$

式中, θ 为土壤体积含水率($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$), θ_r 为残余含水率($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$), m, n 和 α 为参数.

风沙土含水率对应的土壤水吸力如表 1 所示^{[32,1)},

1) 黄强. 咸水灌溉条件下塔克拉玛干沙漠土壤的水盐运动规律. 西北农林科技大学博士学位论文, 2002

表 1 风沙土含水率对应的土壤水吸力

含水率/m ³ ·m ⁻³	0.23	0.24	0.22	0.14	0.13	0.12	0.10	0.07	0.06	0.06
土壤水吸力/m	0.58	0.58	0.70	0.84	1.00	1.04	1.11	1.21	1.37	1.40

经拟合得

$$\theta = \frac{0.43}{[1 + (1.8947S)^{2.8997}]^{0.6551}} \quad (7)$$

3.2 风沙土的人渗特性

采用双环入渗试验测得塔克拉玛干沙漠风沙土入渗速率与入渗时间的关系如图 2 所示, 累积入渗量与入渗时间的关系如图 3 所示. 入渗速率与入渗时间的关系符合 Horton 公式

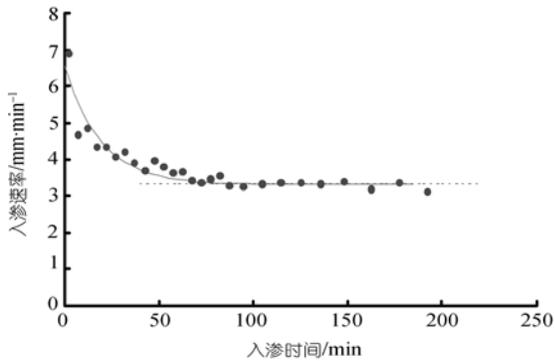


图 2 入渗速率与入渗时间的关系

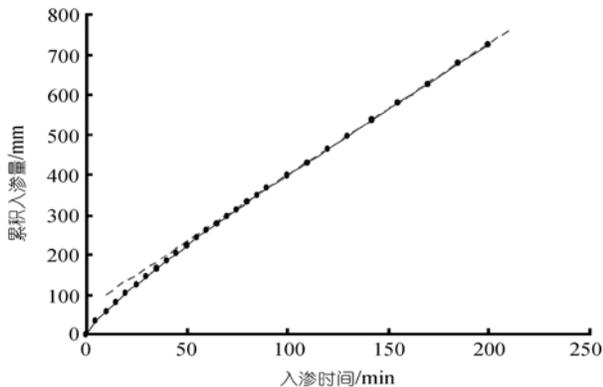


图 3 累积入渗量与入渗时间的关系

$$i = 3.3015 + (6.5446 - 3.3015)\exp(-0.0517t), \quad (8)$$

式中, t 为入渗时间(min), i 为入渗速率($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$).

在开始时入渗速率最大, 继之随时间而降低. 其

降低的速率, 开始大, 而后逐渐变小, 一直到入渗速率趋近于稳定入渗速率. 风沙土渗透能力极强, 稳定入渗速率 $i_c \approx 3.3015 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} = 3.3015 \times 24 \times 60 = 4754.16 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$.

3.3 土壤饱和导水率

土壤的饱和导水率采用下式计算^[36]:

$$K_s = 2d_{10}^2 e^2 \times 10 \times 24 \times 3600, \quad (9)$$

式中, d_{10} 为有效粒径(mm), e 为土壤孔隙比.

因为 $e/(1+e) = \theta_s$, θ_s 为饱和含水率, $\theta_s = 0.43$, 所以 $e = 0.75$.

风沙土的机械组成如表 2 所示, 根据颗粒级配曲线得 $d_{10} = 0.07 \text{ mm}$.

$$K_s = 2d_{10}^2 e^2 \times 10 \times 24 \times 3600 = 2 \times 0.07^2 \times 0.75^2 \times 10 \times 24 \times 3600 = 4762.8 \text{ mm/d}.$$

当入渗时间很长, 土壤达到饱和时稳定入渗速率趋近于土壤的饱和导水率^[37,38], 根据双环入渗的试验结果, $K_s = 4754.16 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$. 最后取二者的平均值, $K_s = 4758.5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$.

3.4 土壤非饱和导水率

采用现场垂直入渗土壤水分再分配法(瞬时剖面法)^[12,39,40]测定.

(i) 测定原理. 对于非饱和垂直一维流动, 取坐标向下为正, 由达西定律得

$$\begin{aligned} q(Z) &= -K(\theta) \frac{\partial(\varphi_m - Z)}{\partial Z} \\ &= -K(\theta) \frac{\partial(-S - Z)}{\partial Z} = K(\theta) \left(\frac{\partial S}{\partial Z} + 1 \right), \end{aligned} \quad (10)$$

则有

$$K(\theta) = \frac{q(Z)}{\frac{\partial S}{\partial Z} + 1} \approx \frac{q(Z)}{\frac{\Delta S}{\Delta Z} + 1}. \quad (11)$$

表 2 土壤机械组成

	粗沙	细沙	粗沙	粗沙	粗沙	黏粒	物理性黏粒
粒径/mm	1~0.25	0.25~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	<0.001	<0.001
含量(%)	23.47	71.62	1.94	0.07	0.39	2.52	2.98

由质量守恒原理可知

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial Z} \quad (12)$$

对上式在 Z_0 至 Z 积分得

$$q(Z) = q(Z_0) - \frac{1}{\Delta t} \left[\int_{Z_0}^Z \theta(t_{i+1}) dZ - \int_{Z_0}^Z \theta(t_i) dZ \right], \quad (13)$$

故

$$K(\theta) = \frac{q(Z_0) - \frac{1}{\Delta t} \left[\int_{Z_0}^Z \theta(t_{i+1}) dZ - \int_{Z_0}^Z \theta(t_i) dZ \right]}{\frac{\Delta S}{\Delta Z} + 1}, \quad (14)$$

式中, $q(Z)$ 为任一土层深度 Z 处的土壤水流通量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$), $K(\theta)$ 为非饱和土壤导水率 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$), ϕ_m 为土壤基质势 (m), θ 为土壤容积含水率 ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), t 为时间 (d).

(ii) 测定方法. 2007年9月25日至10月8日、10月14日至10月20日先选定一块无植被的地块, 在地块中间埋设好中子管. 为了造成垂直入渗-维流条件, 在较大范围内围堰淹灌, 当土壤达到较高含水量后, 停止淹灌, 随后用塑料布覆盖, 以防蒸发, 致使表面的通量为零, 随着时间的延长, 土壤剖面含水量下降, 用中子仪测定不同时刻的含水量分布, 土壤水吸力分布采用土壤水分特征曲线换算.

(iii) 测定结果. 塔克拉玛干沙漠风沙土非饱和和导水率与土壤水吸力的关系如图4所示, 经拟合得

$$K(S) = \frac{4758.5}{1 + 1186.10386S^{3.8937}}, \quad (15)$$

两者相关性较好.

4 潜水蒸发强度与潜水埋深的关系

将 $K_s = 4762.8$, $f = 1186.1038$, $N = 3.8937$ 代入(5)

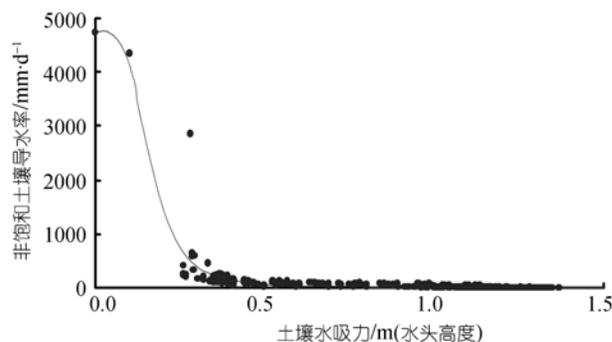


图4 塔克拉玛干沙漠风沙土非饱和和导水率与土壤水吸力的关系

式得

$$E_{\max} = 6.1797H^{-3.8937}. \quad (16)$$

5 结论与讨论

(i) 塔克拉玛干沙漠地区土壤多为风成沙, 土壤颗粒粗、组成均匀, 用 Van Genuchten 提出的水分特征曲线公式描述塔克拉玛干沙漠地区土壤水分特性, 效果较好.

(ii) 潜水极限蒸发强度仅决定于土壤的特性和潜水埋深. 潜水极限蒸发强度随潜水埋深的增大而呈幂函数关系递减. 指数 $m = 3.8937$, 介于 1~4 之间, 与前人得出的指数一般在 1~4 之间, 砂性土指数较大的结论相一致¹⁾.

(iii) 塔克拉玛干沙漠地区降水稀少, 蒸发强烈, 表层土壤含水量极低^[41,42], 土壤水吸力趋于无穷大, 潜水埋深相对稳定, 基本满足定水位条件下均质土壤稳定蒸发的条件. 因此, 可以根据潜水蒸发极限强度计算公式来近似估算塔克拉玛干沙漠地区非冻结期的潜水蒸发量.

参考文献

- Gardner W R. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from water table. *Soil Sci*, 1958, 85: 228—232
- Chbot R, Bouarfa S, Zimmer D, et al. Sugarcane transpiration with shallow water table: Sap flow measurements and modeling. *Agricultural Water Management*, 2000, 54: 17—36
- Soppe R W O, Ayars J E. Characterizing ground water use by safflower using weighing lysimeters. *Agric Water Manage*, 2003, 60: 59—71
- Hurst C A, Thorburn P J, Lockington D, et al. Sugarcane water use from shallow water tables: Implications for improving irrigation water use efficiency. *Agric Water Manage*, 2004, 65: 1—19
- Kahlowan M A, Ashraf M, Haq Z-U. Effect of shallow groundwater table on crop water requirements and crop yields. *Agric Water Manage*, 2005, 76: 24—35

1) 清华大学农田水利教研组. 非饱和土壤水运动基本原理, 1980

- 6 Babajimopoulos C, Panoras A, Georgoussia H, et al. Contribution to irrigation from shallow water table under field conditions. *Agric Water Manage*, 2007, 72: 205—210
- 7 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 潜水稳定蒸发的分析与经验公式. *水利学报*, 1984, (8): 60—64
- 8 唐海行, 苏逸深, 张和平. 潜水蒸发的实验研究及其经验公式的改进. *水利学报*, 1989, (10): 37—44
- 9 沈振荣. 水资源科学实验与研究——大气水、地表水、土壤水、地下水相互转化关系. 北京: 中国科学技术出版社, 1992. 213—231
- 10 程先军. 有作物生长影响和无作物时潜水蒸发的研究. *水利学报*, 1993, (6): 37—42
- 11 毛晓敏, 杨诗秀, 雷志栋. 叶尔羌河流域裸地潜水蒸发的数值模拟研究. *水科学进展*, 1997, 8(4): 313—320
- 12 雷志栋, 杨诗秀, 谢林传. 土壤水动力学. 北京: 清华大学出版社, 1988. 136—151, 220—263
- 13 武明仁. 灌溉排水. 北京: 农业出版社, 1994. 20—23
- 14 张蔚榛, 张瑜芳. 包气带水分运移问题讲座:(四)蒸发条件下土壤水运动(上). *水文地质工程地质*, 1981, (4): 55—59
- 15 胡顺军, 田长彦, 宋郁东, 等. 裸地与柽柳生长条件下潜水蒸发计算模型. *科学通报*, 2006, 51(增刊 I): 36—41
- 16 贝弗尔, 等著. 周传槐, 译. 土壤物理学. 北京: 农业出版社, 1983. 360—361
- 17 高文仲. 定水位均质土壤稳定蒸发的极限强度计算. *水文地质工程地质*, 1985, (2): 16—17, 56
- 18 Jury W A, Gardner W R, Gardner W H. *Soil Physics*. 5th ed. New York: John Wiley and Son, 1991. 97—99
- 19 张蔚榛. 地下水与土壤水动力学. 北京: 中国水利水电出版社, 1996. 239—242
- 20 张蔚榛, 沈荣开. 地下水与地下水调控. 北京: 中国水利水电出版社, 1998. 102—122
- 21 郭元裕. 农田水力学. 第三版. 北京: 中国水利水电出版社, 1997. 23—24
- 22 马英杰, 王志明. 定水位条件下层状土壤潜水蒸发关系研究. *水利学报*, 2005, (增刊): 310—314
- 23 史文娟, 沈冰, 汪志荣, 等. 高地下水位条件下盐渍土区潜水蒸发特性及计算方法. *农业工程学报*, 2006, 22(5): 32—35
- 24 胡顺军, 康绍忠, 宋郁东. 塔里木盆地潜水蒸发规律与计算方法研究. *农业工程学报*, 2004, 20(2): 49—53
- 25 瞿兴业, 张友义, 苏锦星, 等. 地下水蒸发与埋深关系指数 $n=3$ 的非稳定渗流排水计算. *水利学报*, 1983, (9): 48—53
- 26 赵华, 张友义. 地下水蒸发影响下农田排水沟(管)间距的非稳定渗流数值解. *水利学报*, 1986, (11): 35—38
- 27 马英杰, 沈冰, 虎胆·吐马尔拜. 蒸发影响下农田排水沟(管)间距的计算. *水利学报*, 2006, 37(10): 1264—1269
- 28 宋郁东, 樊自立, 雷志栋. 中国塔里木河水资源与生态问题研究. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2000. 249—262
- 29 潘启民, 任志远, 郝国占. 黑河流域生态需水量分析. *黄河水利职业技术学院学报*, 2001, 13(1): 14—16
- 30 王根绪, 程国栋. 干旱内陆流域生态需水量及其估算. *中国沙漠*, 2002, 22(2): 129—134
- 31 徐新文, 李丙文, 王晓静. 塔克拉玛干沙漠腹地沙地咸水灌溉技术研究. *科学通报*, 2006, 51(增刊 I): 133—136
- 32 黄强, 刘玉芸, 李生秀, 等. 塔克拉玛干沙漠土壤水分运动参数的计算. *干旱区地理*, 2002, 25(1): 75—78
- 33 黄强, 李生秀, 宋郁东. 咸水灌溉沙地后的水盐运移规律. *土壤学报*, 2003, 40(3): 547—553
- 34 Van Genuchten, M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Soil Sci Soc Am J*, 1980, 44: 892—989
- 35 许迪, 蔡林根, 王少丽, 等. 农业持续发展的农田水土管理研究. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. 75—100
- 36 毛昶熙. 渗流分析计算与控制. 北京: 中国水利水电出版社. 第2版. 2003. 343
- 37 同延安. 土壤植物大气连续体系中水运移理论与方法. 西安: 陕西科学技术出版社, 1998. 97—121
- 38 河南省人民胜利渠管理局, 等主编. 灌区水盐监测预报理论与实践. 郑州: 黄河水利出版社, 1997. 104—105
- 39 李韵珠, 李保国. 土壤溶质运移. 北京: 科学出版社, 1998. 264—294
- 40 华孟, 王坚. 土壤物理学. 北京: 北京农业大学出版社, 1994. 296—299
- 41 中国石油天然气总公司塔里木石油勘探开发指挥部. 塔里木石油公路. 北京: 石油工业出版社, 1996. 91—93
- 42 中国科学院塔克拉玛干沙漠综合科学考察队. 塔克拉玛干沙漠地区水资源评价与利用. 北京: 科学出版社, 1993. 156—164