

纸坊沟流域水系最佳集水面积阈值确定方法研究

郑伟, 高焕霖, 张明浩, 张青峰

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为更加准确判定流域水系最佳集水面积阈值,以陕西省安塞县纸坊沟流域 30 m DEM 为例,采用均值变点分析方法对流域水系分维值、DEM 分辨率与集水面积阈值之间的关系进行了分析。结果表明:(1) 集水面积阈值与分维值的关系:不同分辨率 DEM,随着集水面积阈值的增加,分维值呈先增后减趋势,且其下降速度由急剧变为缓慢;(2) DEM 分辨率与分维值的关系:在最佳集水面积阈值条件下,随着 DEM 分辨率的减小,分维值整体趋于下降,且其下降速度越来越缓慢;(3) 纸坊沟流域水系分维值为 1.20,所对应的最佳集水面积阈值、DEM 分辨率分别为 100,15 m。均值变点分析方法可用于最佳集水面积阈值和 DEM 分辨率的快速确定,且可靠性较高,判定系数达 0.99。研究结果为流域河网水系提取时集水面积阈值的确定提供了方法参考依据。

关键词:集水面积阈值; 分维值; 纸坊沟

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)05-0067-05

Study on Methods of Determining Optimal Catchment Area Threshold in Zhifanggou Catchment

ZHENG Wei, GAO Huanlin, ZHANG Minghao, ZHANG Qingfeng

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to determine the optimal catchment area threshold of catchment accurately, 30 m DEM of Zhifanggou Catchment located in Ansai County of Shaanxi Province was taken as the example. And the mean change point analysis method was used to analyze the relationships between catchment fractal dimension, DEM resolution and catchment area threshold. The results show that: (1) the relationship between the catchment area threshold and fractal dimension presents that the fractal dimension value increases first and then decreases and its rate of decline changes from rapidness to slowness with the increase of the catchment area threshold under different resolutions of DEM; (2) the relationship between DEM resolution and fractal dimension value indicates that the fractal dimension value tends to decrease as a whole and its rate of decrease is getting slower and slower with the decrease of DEM resolution under the threshold of optimal water catchment area; (3) the box fractal dimension of the drainage system of the Zhifanggou catchment is 1.20, the corresponding value of optimal catchment area threshold and the optimal DEM resolution are 100 m and 15 m, respectively; the mean change point analysis method is more accurate and reliable for determining the optimal catchment area threshold and the optimal DEM resolution and decision coefficient reaches up to 0.99. These research results can provide the references for determining the optimal catchment area threshold of other river network water system extraction.

Keywords: catchment area threshold; fractal dimension; Zhifanggou catchment

集水面积阈值又称临界集水面积,是指支撑一条河道永久性存在所需要的最小集水面积^[1],它决定了

河网水系的形态特征,是提取河网水系的重要参数^[2]。同一流域在不同集水面积阈值下所提取的河

收稿日期:2019-12-29

修回日期:2020-01-20

资助项目:国家自然科学基金面上项目“微地形条件下黄土耕作坡面水蚀发育过程的三维数值模拟与机理研究”(41371273)

第一作者:郑伟(1995—),男,陕西铜川人,硕士生,研究方向为 GIS 设计与数字制图。E-mail:1525358734@qq.com

通信作者:张青峰(1974—),男,山西孝义人,教授,博士生导师,主要从事土地资源与空间信息技术研究。E-mail:zhqf@nwsuaf.edu.cn

网水系具有自相关性特征并可以用分维值来描述^[3]。目前,科学家们多以数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据为基础,采用分形维数法、改进适度指数法、网格法、河源密度法、河网密度法等^[4-8]进行最佳集水面积阈值的确定,均取得了良好的效果。如:吴泰兵等^[4]基于改进适度指数法将获取的适度指数分布曲线顶点处阈值设为集水面积阈值;林峰等^[5]通过网格法计算水系分维,并且提出将集水面积阈值中拐点处计算得到的分维值视为研究区的水系分维值;孔凡哲等^[6]通过研究河源密度与集水面积阈值的关系来确定理想的集水面积阈值;关颖慧等^[7]通过对河网密度及河源密度与集水面积阈值的幂函数二阶求导确定了集水面积阈值出现拐点的范围;王林等^[8]基于 Horton 定理计算流域水系分维值,并根据水系分维值与集水阈值的关系,提出把分维值趋于平缓的点作为集水阈值。但从目前的文献来看,最佳集水面积阈值确定方法仍不够明确,有待进一步深入研究。

与此同时,DEM 作为基础输入数据广泛应用于坡度、坡长、流域面积等地形要素和水文参数的提取^[9-10]。研究表明^[11],DEM 网格分辨率会影响河网提取的精确性,并对流域地形特征产生影响^[12]。网格的增大会增加平地处流向确定的随意性,分辨率的减小导致超过集水面积阈值的栅格数目减少,集水面积阈值也会随之而改变,所形成的水系河网变得稀疏,分维值下降。然而,由分形理论的定义可知,针对某一特定流域,仅存在唯一准确的水系分维值。因此,通过分维值与 DEM 分辨率之间相互关系的研究成为最佳集水面积阈值确定的必要条件。

为此,本文以陕西省安塞县纸坊沟流域为例,对集水面积阈值、DEM 分辨率与分维值之间的关系进行分析,探讨了最佳集水面积阈值的确定方法,以期对河网水系的精确提取提供可靠的方法依据。

1 研究区概况与数据来源

陕西省安塞县纸坊沟流域(109°14'36"—109°16'03"E, 36°42'42"—36°46'28"N)属于黄土高原丘陵沟壑区第二副区,面积达 8.27 km²,形状呈长条形。流域属暖温带半干旱气候,年均降水量 483 mm,年均气温 8.8℃,日照充足,气温温差较大;降雨分配不均,6—9 月的降水量占全年降水总量的 73%左右,且多为暴雨形式。流域内沟谷密集,地面起伏大,沟壑密度 8.06 km/km²,海拔 1 030 ~ 1 407 m。流域内土壤主要为黄绵土,植被主要为干旱草本植物。

采用地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)提供的 2018 年 DEM 数据(空间分辨率为 30 m×30 m)。在 ArcGIS 软件中采用“最邻近分配法(NEAREST)”进行重采样处理,生成 5 m, 10 m, 15 m, ..., 90 m 等 18 种不同空间分辨率的 DEM。

2 研究方法

2.1 水系提取

针对不同分辨率的 DEM,分别按照“填洼→流向→流量→河流链接”的步骤进行水系提取。其中,在提取栅格河网时,以 20 个栅格数目为间隔在 60~300 之间共设置 13 种集水面积阈值,即每种空间分辨率 DEM 可提取 13 种不同的水系,共有 234(18×13)种水系。

2.2 水系分维值计算

对于某一特定水系,假设被边长为 r 的网格所覆盖的网格数目为 $N(r)$ 。当 r 变化时,所对应的网格数目 $N(r)$ 也会变化,从而可得到一系列 $r-N(r)$ 数值;对 $r-N(r)$ 分别取对数并绘制 $\lg r-\lg N(r)$ 双对数图,再用最小二乘法拟合双对数图的直线,该直线的斜率即为水系的分维值 D ^[13-14]。根据分维数的含义,当 r 趋于 0 时,计算出的分维值最准确,则分维值 D 用如下公式表示:

$$D = -\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg N(r)}{\lg r} \quad (1)$$

2.3 均值变点分析法

均值变点分析法是一种对非线性数据进行处理的数据统计方法,该方法对恰有一个变点的检验最为有效^[15]。本文以河网水系的分维值序列作为样本数据,采用均值变点分析法确定分维值的变点以寻找所对应的最佳河网水系及其 DEM 河网分辨率。其计算过程大致如下:设河网水系分维值序列为 $\{D_i, i = 1, 2, 3, \dots, n\}$ (计算最佳集水面积阈值和 DEM 分辨率时, n 分别为 13, 18)。

(1) 将每个 D_i 样本分为任意两段: $\{D_1, D_2, \dots, D_{i-1}\}$ 和 $\{D_i, D_{i+1}, \dots, D_n\}$ 。则每段样本算术平均值 $\overline{D_{i1}}$ 和 $\overline{D_{i2}}$ 及样本分段后统计量 S_i 为:

$$\overline{D_{i1}} = \sum_{t_1=1}^{i-1} \frac{D_{t_1}}{i-1} \quad (t_1 = 1, 2, 3, \dots, i-1) \quad (2)$$

$$\overline{D_{i2}} = \sum_{t_2=i}^n \frac{D_{t_2}}{n} \quad (t_2 = i, i+1, i+2, \dots, n) \quad (3)$$

$$S_i = \sum_{t_1=1}^{i-1} (D_{t_1} - \overline{D_{i1}})^2 + \sum_{t_2=i}^n (D_{t_2} - \overline{D_{i2}})^2 \quad (4)$$

(2) 计算原始样本算术平均值 \overline{D} 和原始样本统

计量 S :

$$\bar{D} = \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{n} \quad (5)$$

$$S = \sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2 \quad (6)$$

(3) 计算 S 与 S_i 差值的期望值 $E(S - S_i)$:

$$E(S - S_i) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

$$E(S - S_i) = E[n - 1(i - 1)(n - i + 1)(\bar{D}_{i1} - \bar{D}_{i2})^2] \quad (8)$$

变点的存在会使原始样本统计量 S 与样本分段后统计量 S_i 之间的差距增大, 两者间最大差值所对应的点称为变点。

3 结果与分析

3.1 最佳集水面积阈值

3.1.1 集水面积阈值与分维值的关系 在利用 ArcGIS 提取流域河网水系时, 河网水系会随所设置集水面积阈值的不同而变化。因此需要通过分析不同集水面积阈值与水系分维值的变化关系特征推断出合理的阈值, 以此来确定流域水系的准确分维值。本文根据公式(1)进行分维值的计算, 并统计不同 DEM 分辨率下集水面积阈值及其分维值的变化关系, 见图 1。

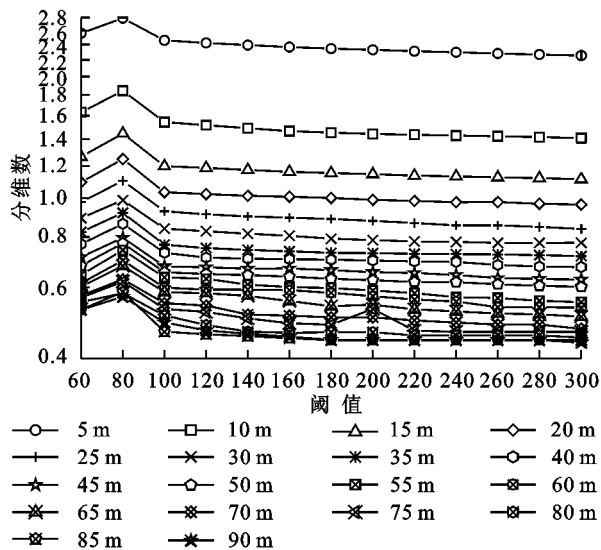


图 1 不同分辨率 DEM 下集水面积阈值与分维值的关系

从图 1 可以看出, 不同分辨率 DEM, 随着集水面积阈值的增加, 分维值呈先增后减趋势, 且其下降速度由急剧变为缓慢, 这主要是由于随着集水面积阈值的增大, 汇流累积栅格之间的差异会减小, 导致水系河网稀疏, 进而分维值变小。

3.1.2 最佳集水面积阈值的确定与验证 为进一步确定最佳集水面积阈值, 根据公式(2)~(6)得到 S 与 S_i 的差值变化曲线, 见图 2。从图 2 看出, 在集水

面积阈值小于 100 时, 分维值变化幅度最大; 在集水面积阈值大于 100 时, 分维值的变化较为平缓。这说明在 S 和 S_i 差值变化曲线上, 存在一个由陡到缓的拐点。同时, 本文以分维值与集水面积阈值之间关系的对数函数曲线进行二阶求导^[7]对最佳集水面积阈值进行验证(图 3)。由此可知, 不同分辨率 DEM 的 S 和 S_i 的差值在第 3 个点(拐点)时达到最大。该拐点所对应的集水面积阈值可判定为最佳集水面积阈值, 即纸坊沟流域最佳集水面积阈值为 100 个栅格数目。利用均值变点分析法来确定最佳集水面积阈值具有可行性。

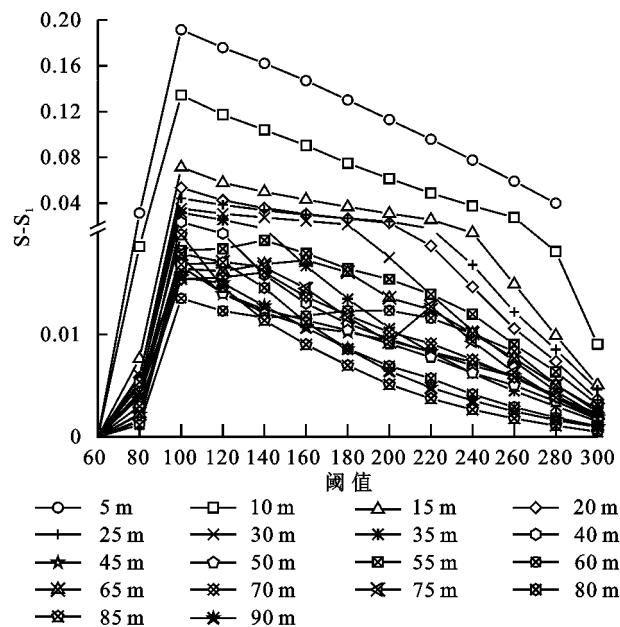


图 2 不同分辨率 DEM 下 S 和 S_i 差值的变化曲线

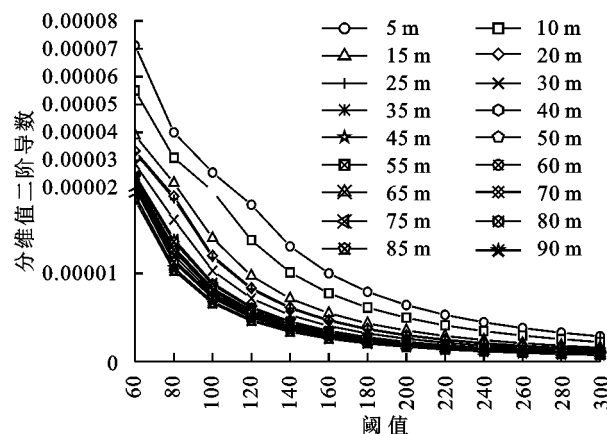


图 3 不同分辨率 DEM 下分维值与集水阈值对数函数求导

3.2 最佳 DEM 分辨率

3.2.1 DEM 分辨率与分维值的关系 为了进一步说明 DEM 分辨率变化对分维值的影响, 本文在最佳集水面积阈值条件下, 绘制了 DEM 分辨率与分维值的关系图, 见图 4。从图 4 可以看出, 随着 DEM 分辨率的减小, 分维值整体趋于下降, 且其下降速度越来越

越缓慢。当 DEM 分辨率由 5 m 变化至 15 m,关系曲线下降趋势明显,分维值由 2.46 减少到 1.20。另外,DEM 分辨率变化与分维值的函数拟合后得到的拟合系数 R^2 为 0.994,表明 DEM 分辨率与其对应的分维值有着极强的相关性。

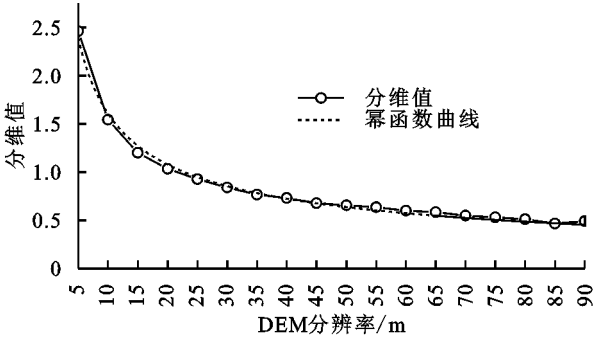


图 4 DEM 分辨率变化与分维值的关系

3.2.2 最佳 DEM 分辨率的确定与验证 利用均值变点分析法对图 4 中拟合曲线上的拐点进行识别,根据公式(2)和(3)计算每段样本的算术平均值与统计量,根据公式(4)和(5)计算原始样本的算术平均值和统计量,可以得出 S 与 S_i 的差值变化曲线如图 5 所示。由图 5 可知,在第 3 个点时 S 与 S_i 的差值达到最大($S-S_i=3.01$)。在 DEM 分辨率等于 15 m 前后, S 与 S_i 的差值变化曲线存在一个由陡到缓的拐点,该点所对应的 DEM 分辨率即为最佳分辨率(15 m),其所对应的分维值为该流域最准确的分维值。

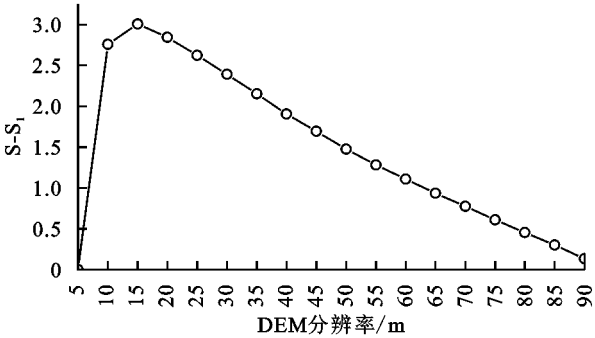


图 5 S 和 S_i 差值的变化

对分维值与 DEM 分辨率的关系分别进行幂函数、指数、对数、线性等趋势拟合(表 1)。由表 1 可知,幂函数的拟合度最好。

表 1 分维值与 DEM 分辨率拟合函数

函数	公式	相关系数 R^2
幂函数	$y = 5.4577 x^{-0.544}$	0.9944
指数函数	$y = 1.5461e^{-0.015x}$	0.8391
对数函数	$y = -0.581\ln(x) + 2.9535$	0.904
线性函数	$y = -0.0145 x + 1.5341$	0.6265

对幂函数进行二阶求导:在最佳集水面积阈值确定情况下,通过得到分维值幂函数二阶导数与 DEM

分辨率的关系曲线,验证了最佳 DEM 分辨率(图 6)。由此可知,DEM 分辨率在 15 m 时出现拐点,该拐点所对应的 DEM 分辨率即为最佳 DEM 分辨率。此时计算得出纸坊沟流域的分维值为 1.20,即流域地貌发育阶段处于幼龄期。

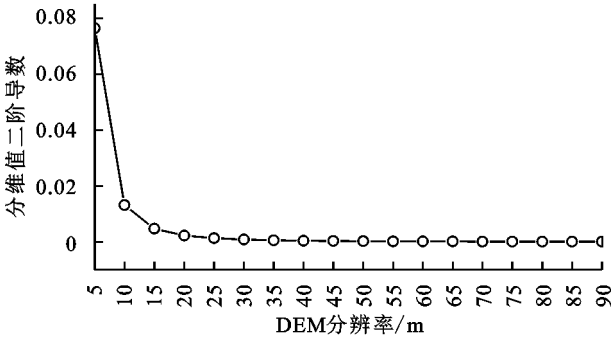


图 6 DEM 分辨率变化与分维值幂函数求导

4 讨论

集水面积阈值是通过 DEM 提取河网水系时的一个重要参数,准确的集水面积阈值对于水系的提取和分维值计算的精确性有着重要影响。集水面积阈值越大,汇流累积栅格数目超过集水面积阈值的栅格数目就会变少,河道数目也会逐渐减少,导致河网稀疏,分维值下降^[7]。

对同一个流域而言,不同分辨率 DEM 所提取的流域边界基本一致,但提取的流域水系形态有着明显的差异。分辨率越高,越能提取复杂的流域特征及细小的水系。随着分辨率的降低,水系被简化,河网相对会比较稀疏^[16-17]。这是由于 DEM 分辨率精度不能真实反映地形的特征所造成的。

本研究中水系提取所采用的算法是 D8 算法,即通过计算中心栅格与周边临近网格中最陡坡度的方法来判定流向^[5],该算法在 DEM 栅格中把河网水系的位置与流量结合在一起,但忽略了水流方向的不确定性。

由于均值变点分析方法对于仅有一个变点的检验最为有效^[15],而且快速简单。集水面积阈值、DEM 分辨率和分维值的变化关系恰好符合这一特征。因此,本文采用均值变点分析法来确定最佳集水面积阈值和 DEM 分辨率。

需要说明的是,本文只利用均值变点方法分析了不同集水面积阈值和 DEM 分辨率对流域水系分维值的影响,没有考虑流域内其他因素的影响。因此,还应对流域内降雨、气温、地形特征以及人为活动等影响因素进行进一步的研究,以期综合治理小流域生态环境的改善提供一定的参考依据。

5 结 论

- (1) 陕西安塞纸坊沟流域水系的最佳集水面积阈值为 100,最佳 DEM 分辨率为 15 m,分维值为 1.20;
- (2) 集水面积阈值和 DEM 分辨率的变化直接关系到流域水系分维值的大小。集水面积阈值的增大导致流域河网稀疏,分维值下降;随着分辨率的降低,水系被简化,河网相对会比较稀疏,分维值也随之降低;
- (3) 利用均值变点分析法确定最佳集水面积阈值和 DEM 分辨率具有高效可靠的特点。

参考文献:

[1] O'Callaghan J F. The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data [J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1984,28(3):323-344.

[2] 杨邦,任立良.集水面积阈值确定方法的比较研究[J].水电能源科学,2009,27(5):11-14.

[3] 梁启君,梁军,王少华,等.分形在数字水系累计汇水量阈值确定中的应用研究[J].地理与地理信息科学,2013,29(1):111-112.

[4] 吴泰兵,夏达忠,张行南.基于改进适度指数法的流域流网阈值确定研究[J].水电能源科学,2011,29(4):18-20.

[5] 林峰,陈兴伟,王林.基于 DEM 的九龙江流域水系分维估算[J].水资源与水工程学报,2009,20(1):29-32.

[6] 孔凡哲,李莉莉.利用 DEM 提取河网时集水面积阈值的

确定[J].水电能源科学,2005,23(4):65-67.

[7] 关颖慧,郑粉莉,王彬,等.基于 DEM 的黑龙江宾州河流域水系提取试验研究[J].水土保持通报,2012,32(1):127-131.

[8] 王林,陈兴伟.基于 DEM 的流域水系分维计算与结果与分析[J].地球信息科学,2007,9(4):133-137.

[9] 任立良,刘新仁.基于数字流域的水文过程模拟研究[J].自然灾害学报,2000,9(4):45-52.

[10] 都金康,谢顺平,许有鹏,等.分布式降雨径流物理模型的建立和应用[J].水科学进展,2006,17(5):637-644.

[11] 吴险峰,刘昌明,王中根.栅格 DEM 的水平分辨率对流域特征的影响分析[J].自然资源学报,2003,18(2):148-154.

[12] 林声盼,荆长伟,MOORE Nathan,等.数字高程模型分辨率对流域地形特征参数的影响[J].水科学进展,2012,23(4):457-463.

[13] 何隆华,赵宏.水系的分形维数及其含义[J].地理科学,1996,16(2):124-128.

[14] 崔灵周,李占斌,肖学年.岔巴沟流域地貌形态分形特征量化研究[J].水土保持学报,2004,18(2):41-44.

[15] 项静恬.非线性系统中数据处理的统计方法[M].北京:科学出版社,1997:3-6.

[16] 罗大游,温兴平,沈攀,等.基于 DEM 的水系提取及集水阈值确定方法研究[J].水土保持通报,2017,37(4):189-193.

[17] 王雪,李精忠,余斌.基于 DEM 提取流域特征影响因子的分析[J].测绘与空间地理信息,2019,42(6):38-42.

(上接第 66 页)

[26] Lepš J, Šmilauer P. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO[M]. New York:Cambridge University Press, 2003.

[27] An K, Wang W, Wang Z, et al. Estimation of ground heat flux from soil temperature over a bare soil[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2017,129(3):913-922.

[28] 莫兴国,李宏轩,刘苏峡,等.用土壤温度估算表层土壤导温率与热通量的研究[J].中国生态农业学报,2002(1):66-68.

[29] Horton R, Wierenga P. Estimating the soil heat flux from observations of soil temperature near the surface 1[J]. Soil Science Society of America Journal, 1983,47(1):14-20.

[30] Philip J R, Devries D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradient[J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 1957,38(2):222-232.

[31] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1 [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980,44(5):892-898.

[32] 康绍忠,张建华,梁建生.土壤水分与温度共同作用对植物根系水分传导的效应[J].植物生态学报,1999,23(3):211-219.

[33] 安可栋.旱区土气界面水热传输机理及对包气带水热运移的影响[D].西安:长安大学,2016.

[34] Gurr C, Marshall T, Hutton J. Movement of water in soil due to a temperature gradient[J]. Soil Science, 1952,74(5):335-346.

[35] 曾亦键.浅层包气带水—汽—热耦合运移规律及其数值模拟研究[D].北京:中国地质大学(北京),2012.