

近 50 年来黑河出山径流对气候变化的响应

李卓仑, 王乃昂, 李 育, 来婷婷, 路俊伟

(兰州大学 资源环境学院 兰州大学干旱区水循环与气候变化研究中心, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 以黑河上游祁连山区祁连和野牛沟气象站逐月气象数据为基础, 采用相关分析、多元回归模型、方差分析和时间幂函数的趋势分析等方法, 研究了近 50 a 来影响黑河出山径流的主要气象因素。气象因子与径流的相关分析表明, 冬季和夏季降水量、夏季和秋季月平均最低气温这 4 个气象因子与出山径流的相关系数最高, 可以通过这 4 个气象因子建立多元回归模型模拟黑河出山年径流的变化。其中夏季降水对年径流的贡献最大, 夏季和秋季月平均最低气温对年径流的贡献较小。年径流量变化主要受控于夏季降水量的强弱。时间幂函数的趋势分析结果进一步证实, 黑河出山径流与夏季降水在年代际尺度变化的过程中具有很好的一致性。

关键词: 黑河; 出山径流; 气候变化

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)02-0007-05

中图分类号: P343.1

Variations of Runoff in Responding to Climate Change in Mountainous Areas of Heihe River During Last 50 Years

LI Zhuo-lun, WANG Nai-ang, LI Yu, LAI Ting-ting, LU Jun-wei

(College of Earth and Environmental Sciences, Center for Hydrologic Cycle and Climate Change in Arid Region, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Monthly meteorological data were obtained from typical weather stations located in the upper Heihe River. The influences of climatic factors on the runoff of the river from the mountain areas in the last 50 years were investigated using correlation, multivariate regression, analysis of variance, and trend analysis. The results of correlation show that winter and summer precipitation, summer and autumn mean lowest air temperature had close correlation with the runoff volume. Based on the close relationship, multivariate regression models were then developed to simulate the temporal variations of the runoff from the mountain areas. However, summer mean lowest air temperature showed little contribution to the runoff based on the regression analysis. The annual variations of the runoff were controlled by the precipitation amount in summer. Trend analysis results further confirmed that the runoff varied consistently corresponding to the summer precipitation over time scales of decades.

Keywords: Heihe River; runoff from mountain areas; climate change

河流径流量的变化, 不仅是水文学研究的重要内容, 同时也是全球变化研究的热点问题, 受到了广泛的重视^[1-3]。河流径流量对气候变化的响应, 既涉及到水循环的研究过程, 又是气候变化对水循环影响研究中的关键问题^[4-5]。因此开展河流径流变化对气候变化的响应研究, 不仅可为认识气候变化与水文循环之间相互作用的机理提供事实基础, 也可为河流径流的正确预测提供理论依据。

黑河流域作为我国西北重要的内陆河流域, 对气候变化的响应极其敏感^[6-12]。最近几年的研究, 对近

50 a 出山径流与山区降水的年代际变化的影响因素仍存在争论。虽然大部分学者认为黑河流域各出口流量是趋于增加的^[7, 9-10, 13-15], 但无论是由于黑河上游山区夏季降水量的增加^[10, 14]还是由于上游夏季降水增加和冬春季气温的升高(融雪增加)共同影响^[9, 12, 15], 至今仍存在不同意见, 从而也显示了径流对气候变化响应的复杂性。与此同时, 对黑河上游出山径流的影响因素探讨, 虽然通过一元回归模型检测了出山径流与降水的关系, 但对降水和其它气象要素的组合因素对黑河出山径流的影响研究仍较为薄弱,

收稿日期: 2011-05-11

修回日期: 2011-07-18

资助项目: 国家自然科学基金项目“河西走廊环境变迁的水文背景与生态需水量计算”(50879033); 高等学校博士点专科基金(200902111110025); 教育部博士学术新人奖励计划

作者简介: 李卓仑(1984—), 男(满族), 辽宁省丹东市人, 博士研究生, 主要从事气候变化研究。E-mail: lizhuolunzl@163.com。

需进一步探讨。基于此,本研究以黑河上游的气象、水文数据为基础,探讨近 50 a 来黑河出山径流和气候的年代际变化特点,以及出山径流对不同气象因子的响应程度。

1 材料和方法

1.1 资料来源

以往关于黑河流域上游的气象站选取,由于研究的对象和侧重点,不同学者采用的站点并不相同^[6-8,13,15]。根据最新的黑河流域边界范围^[16]及黑河流域水资源分布特征^[7,17],本研究所用气象资料选取黑河上游祁连和野牛沟气象站 1960—2009 年逐月气象数据,包括平均气温、平均最高气温、平均最低气温和降水量。水文资料选取黑河干流出山口水文站——莺落峡站 1960—2009 年逐年径流量数据。

1.2 研究方法

以选定气象站逐月气象数据和两个站点逐月气象数据的平均值为基础,通过相关分析的方法,检验气象要素与莺落峡水文站逐年径流数据的相关性。选取相关性较高的气象要素指标,通过多元回归的方法,探讨其径流变化对气候的响应。与此同时,气象因子序列受到某种长期因素影响,常含有长期变化趋势^[18],其趋势分析采用时间幂函数的方法进行分析,设某站某个气象要素时间序列为 y_1, y_2, \dots, y_n , 则时间幂函数表示为:

$$H_t = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_p t^p \quad (p < n) \quad (1)$$

式中: H ——拟合值; t ——时间; p ——序列值。方程系数可根据最小二乘法原理确定。

2 结果与讨论

2.1 相关系数

通过逐月、逐季、以及各种连续月份的气象要素组合与年径流数据的相关分析,结果发现,逐季节气象要素与年径流的相关系数,要明显高于逐月的结果。其中,夏季降水量和平均最低温与年径流量相关系数最高(表 1)。

冬季降水与径流呈现一定的正相关关系,其可能的原因是由于气温较低,冬季降水增加会导致冰雪的积累量增加,春季和夏季随温度升高从而积雪消融量增加。冬季除降水量以外,其余气象要素与年径流量相关性较小,表明冬季其余气象要素对该地区出山径流量的影响较小。以往对近 50 a 黑河上游地区冬季气温距平值和年出山径流的趋势研究表明^[9,15],二者在趋势变化上呈现了时间的一致性,由此得出冬季气温升高是造成出山径流增加的主要因素之一,这与本

研究结果存在明显差异。虽然本研究的最低气温与年径流的相关性也通过了 0.05 的显著性检验,但近 50 a 冬季平均气温、平均最高气温和平均最低气温均在 0 °C 以下,因此在近 50 a 冬季温度升高对冰雪消融的贡献可能非常小。但是否是由于地温的升高,造成部分季节冻土融化,目前仍有待于进一步研究。虽然有研究显示^[19],冻土温度受到气温的影响最大,并且在青藏高原地区,拉萨河流域冬季径流的增加可能主要是由于地温升高导致的冻土融化^[20],但由于冬季径流的增加与否并不完全取决于流域的冻土退化,还受到秋冬季节积雪开始前的河流径流变化的影响^[21],并且黑河出山径流季节变化较大^[10],冬季径流占全年径流总量不足 20%,因此,其对其径流的影响程度及贡献率,仍有待深入研究。与此同时,其冬季径流占全年径流的比例较低的特点^[10],与本研究的相关系数所得结果也具有的一致性,另据王建等^[22]研究表明,莺落峡水文站多年月平均径流量,在冬季基本处于稳定状态。阳勇等^[23]对黑河上游 2005 年 9 月至 2007 年 9 月冻土地温的观测结果显示冬季地表地温均在 0 °C 以下。上述研究结果,可进一步说明冬季温度与莺落峡全年径流量之间不存在明显的相关关系,其冬季的升温与否,可能对该地区出山口年径流量变化贡献不大。

表 1 黑河上游气象要素与莺落峡年径流量相关系数统计

季节	站点名	平均气温	平均最高气温	平均最低气温	月平均降水量
冬季	祁连	0.184	0.083	0.267	0.375*
	野牛沟	0.224	0.144	0.271	0.374*
	平均值	0.215	0.127	0.277**	0.436
春季	祁连	0.136	-0.133	0.305**	0.230
	野牛沟	0.162	-0.076	0.305**	0.308**
	平均值	0.152	-0.097	0.311**	0.284**
夏季	祁连	-0.043	-0.331	0.338**	0.618
	野牛沟	0.129	-0.195	0.531*	0.730*
	平均值	0.044	-0.273	0.444*	0.731*
秋季	祁连	0.338**	0.158	0.379*	0.238
	野牛沟	0.225	-0.017	0.337**	0.324**
	平均值	0.290**	0.059	0.369*	0.295**

注: * 表示通过 0.01 水平显著性检验; ** 表示通过 0.05 水平显著性检验。

春季平均最低气温与年径流之间有一定的正相关。黑河上游及其毗邻地区逐月平均气温资料表明(图 1) 4 月该地区月平均气温即在 0 °C 以上,说明冰雪融水对河流补给的可能性。平均最低气温的增高,会导致冰雪和季节冻土消融量增加,从而增加径

流。因此在该季节平均最低气温与年径流之间存在一定的正相关。春季的月平均降水量与年径流仍有一定的相关性,与该区域降水对径流的补给特征具有一致性。与此同时,夏季两站平均降水量与年径流量相关系数最大,为 0.731。这与莺落峡站径流量年内分配极不均匀,主要集中在汛期^[8,10,14],夏季降水占全年降水 87% 以上^[24]的情况相吻合;夏季平均最低气温也与年径流有一定的正相关,最低温度的升高,一方面有助于冰雪融水,另一方面会直接导致冻土消融的增加,两方面均可对径流进一步补给。秋季平均最低气温和降水亦与年径流有一定的相关性。由于黑河上游秋季降水占全年比重较小^[24],虽然降水对径流有一定的补给作用,但相关性较低。另外,10 月是莺落峡径流汛期的最后一个月^[10],秋季平均最低气温的升高,与春季类似,同样会导致冰雪和季节冻土消融量增加,从而对出山径流产生影响,由图 1 可以看出,该区域在 10 月份月平均气温即在 0 °C 以下,其融雪过程基本结束,与黑河上游汛期接触的时间基本一致,也显示了该季节温度与径流的关系。康尔泗等^[25]曾建立了西北干旱区内陆河流域出山径流变化趋势对气候变化响应模型,其中出山径流深为降水量、积雪(含冰雪)融化量、土壤储水变化量的总和减去蒸发量。对积雪(含冰雪)融化量的研究表明,其与温度呈线性函数关系^[25-27],土壤储水变化量则取决于气温的高低和降水量的多寡^[25],这与本研究几项因子相关系数数值相对较高的结果是一致的。

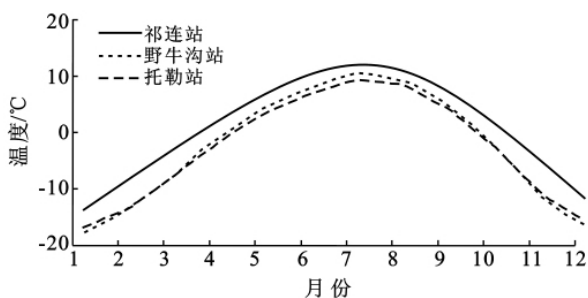


图 1 黑河上游及其毗邻地区(托勒站)逐月平均气温变化

2.2 多元回归模型

逐步回归显示,在进入信度为 0.05,剔除信度为 0.1 的前提下,其最优模型中几个参数均为 4 个季节的月平均降水量。这一点显示了该区域降水作为径流补给的重要来源,也暗示了温度并非为影响该区域年径流的主要气候指标。但考虑模型的环境意义和径流补给中的积雪(含冰雪)融化量等必不可少的因素,在模型建立的过程中,选取直接影响径流量并且与径流相关系数较高的气象因子,并且避免人为增加

个别因子的权重,最后保留 2 站夏季和秋季平均最低气温、冬季和夏季降水量这 4 个因子。建模期为 1960—2000 年,校验期为 2001—2009 年,各项因子与年径流的多元回归模型为:

$$Y = 6.469 + 0.101x_1 + 0.011x_2 + 0.049x_3 + 0.047x_4 \quad (2)$$

式中: Y ——莺落峡年径流量(10^8 m^3); x_1 ——冬季月平均降水量(0.1 mm); x_2 ——夏季月平均降水量(0.1 mm); x_3 ——夏季月平均最低气温(单位 0.1 °C); x_4 ——秋季月平均最低气温(0.1 °C)。复相关系数(R)为 0.823,拟合效果较好,并且通过了置信度为 0.001 的 F 检验。方差检验表明,多元回归模型的方差解释量为 0.678,即上述气象因子可以解释径流变化量的 67.8%,回归方差来源中,冬季(12—翌年 2 月)月平均降水量为 11.82%,夏季(6—8 月)月平均降水量为 54.6%,夏季月平均最低气温为 2.7%,秋季月平均最低气温为 4.3%。这表明夏、秋季最低气温对年径流的贡献率较小,亦表明年径流变化主要是由夏季降水所控制。与此同时,将 2001—2009 年径流数据作为校验期,对建模结果与实测结果进行对比(图 2),二者一致性较高。由此表明,所选的 4 个气象因子可以较好地拟合莺落峡年出山径流。

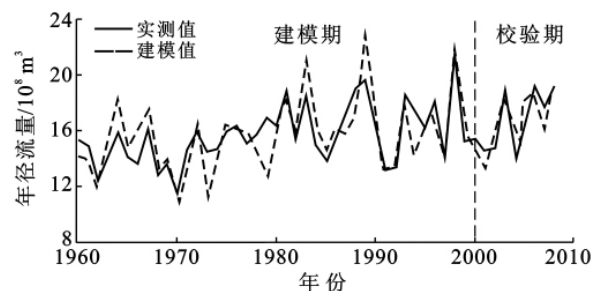


图 2 莺落峡年径流变化实测值与建模值对比

有学者^[9,13]根据径流变化的趋势与温度变化趋势呈现一致性,认为出山径流随温度升高而呈增加的趋势,本研究的多元回归模型显示,虽然夏、秋季节温度升高会对年径流增加产生一定的影响,会增加一定的融雪径流,但其出山径流的主要受控因素为夏季降水,夏季和秋季月平均最低温的升高,对年径流量的贡献有限。与此同时,无论是逐步回归的结果还是根据相关系数选取相关性最高的因子作为参数,冬季和春季月平均最低气温等气象要素均无法在多元回归模型中无法引入。通过多元回归模型显示,黑河上游融雪径流的产生,虽然在春季等降水较少的季节作为径流的重要来源,但在对全年径流量的贡献中,融雪

径流的贡献与降水贡献相比,比例仍然较低。

虽然降水对径流的影响过程较为复杂^[28],但不能盲目的认为其分辨率越高,模拟结果越好^[29]。根据研究的目的,选择较低的时间分辨率和较长的时间尺度同样可以达到很好的结果^[29]。另外,虽然影响出山径流因素较多,但由于主要几个因素中,冰雪融水、土壤含水量变化(含冻土消融)和蒸发量均与温度和降水密切相关,因此,即使本模型中没有直接设定这几个参数,但通过不同季节温度和降水因子的选择,也可以在一定程度上反映上述因素的变化对出山径流的影响。

2.3 径流量趋势分析

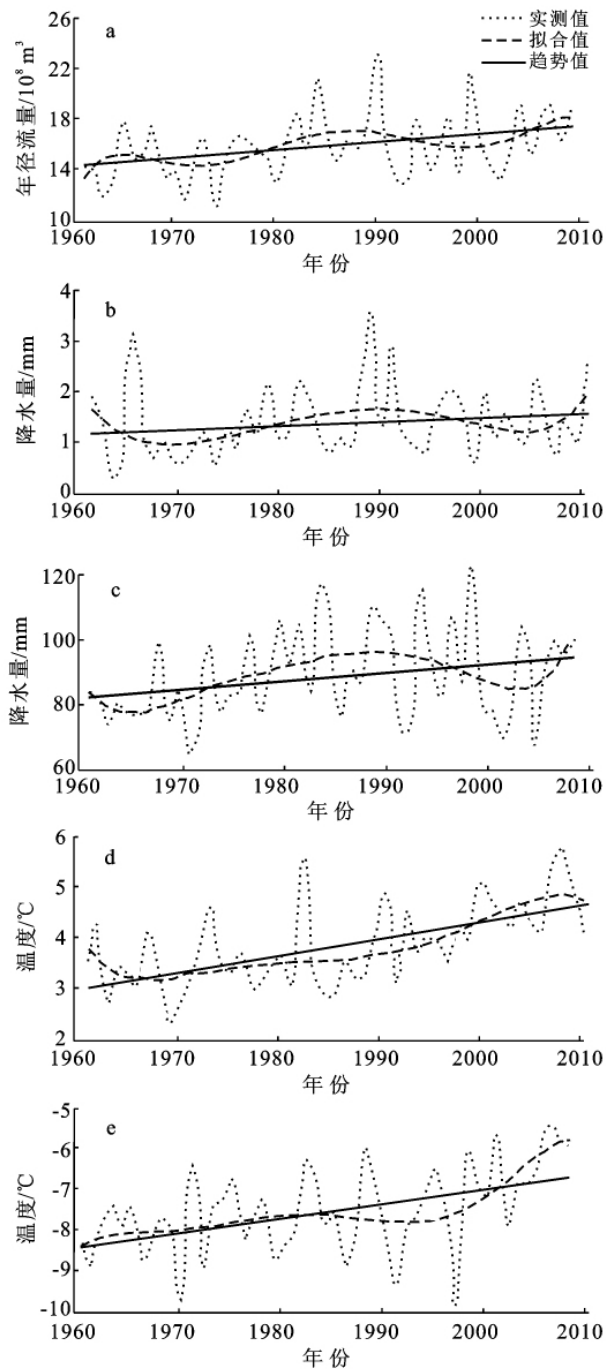
通过时间幂函数的方法进行多项式拟合,其趋势分析结果如图 3 所示。虽然年径流量呈现波动上升的趋势,与研究区冬季和夏季月平均降水量以及夏季和秋季月平均最低气温在总体趋势上呈现一致性,但拟合的结果表明,它们的波动变化过程并非完全吻合。虽然本研究结果与其它研究结果^[9,13]均揭示了径流变化与温度变化在总体上均呈现增加的趋势,但本研究通过年际尺度上的多项式拟合发现,增加趋势的过程中存在不一致的年代际的波动。在年代际尺度的变化中,自 20 世纪 70 年代后期,径流与降水的波动呈现一定的一致性,而与温度的波动呈现一定的反相位关系,波动的过程并不一致。可进一步表明,最低温度的升高对径流的贡献可能比较有限,变化趋势并不与径流量呈现一致的趋势。而降水的多寡和出山径流的变化在年代际尺度的一致性,说明降水对年径流的变化更具有指示意义。

2.4 出山径流对不同气象因子的响应

相关分析表明,黑河年出山径流量与冬季和夏季月平均降水量、夏季和秋季月平均最低气温关系最为显著,根据上游山区冬季和夏季月平均降水、夏季和秋季月平均最低气温这 4 个气象因子建立的多元回归模型,可以很好地拟合莺落峡年出山径流量。但夏季和秋季平均最低气温对年径流量的贡献较小,夏季降水对年径流贡献占主要因素。时间幂函数的趋势分析进一步表明,年径流量在年际尺度的波动与温度并不能呈现很好的对应,而与冬季和夏季月平均降水量对应关系较好。综上所述,黑河出山径流量大小主要受控于夏季降水量的多寡。同时,冬季月平均降水量的多寡,夏季和秋季月平均最低气温的高低,对莺落峡年出山径流的大小有一定的影响。

图 3 趋势分析结果

a 莺落峡出山年径流; b 冬季月平均降水量; c 夏季月平均



降水量; d 夏季月平均最低气温; e 秋季月平均最低气温

同处河西走廊典型内陆河流域的石羊河,近 50 a 出山径流的变化亦受降水影响最大,温度对径流的影响最小^[30],这与本研究对黑河出山径流的研究结果一致,表明祁连山区降水对出山径流影响较大。重标极差(R/S)分析结果也表明,在石羊河流域的上游山区降水增加趋势明显^[18],即石羊河流域出山径流在未来可能存在增加的趋势。施雅风等^[31]曾指出中国西北地区气候可能由暖干向暖湿转变,并将本研究区列为显著转型区,降水会呈增加的趋势。在此前提下,根据本研究出山径流与气象因子的响应关系,黑河出山径流在未来会呈现一定增加的趋势,这与马宏

伟等^[18]关于石羊河流域出山径流未来趋势的分析结果一致。

3 结论

(1) 不同气象因子和莺落峡年出山径流的相关分析显示,其年出山径流量的大小与上游山区冬季和夏季月平均降水、夏季和秋季月平均最低气温有显著的相关性,这4个气象因子可以较好地拟合黑河年出山径流的变化,但夏季和秋季月平均最低气温对出山径流贡献较小,其年径流量的大小主要受控于夏季降水的强弱,而与冬季温度等其它气象因子关系较小。

(2) 趋势分析的结果,莺落峡年径流量在近50 a呈增加趋势,与夏季和秋季月平均最低气温、冬季和夏季月平均降水量在趋势上有一致性。在年代际尺度上,时间幂函数的拟合结果显示莺落峡年径流量与夏季和秋季月平均降水在波动过程中的一致性较好,而与夏季和秋季月平均最低气温波动的一致性较差,进一步表明夏季和秋季月平均最低气温的高低对其年径流量多寡的贡献有限。

(3) 在未来一段时期内,随着祁连山区降水的增加,黑河出山径流可能进一步呈现增加趋势。

[参 考 文 献]

- [1] Watson R, Zinyowera M. Impacts, Adaptation and Mitigation of Climate Change: Scientific Technical Anal Uses [M]. Climate Change Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [2] 夏军, 谈戈. 全球变化与水文科学新的进展与挑战[J]. 资源科学 2002, 24(3): 1-7.
- [3] 张守红, 刘苏峡, 莫兴国, 等. 阿克苏河流域气候变化对潜在蒸散量影响分析[J]. 地理学报, 2010, 65(11): 1363-1370.
- [4] 高前兆, 仵彦卿. 河西内陆河流域的水循环分析[J]. 水科学进展 2004, 15(3): 391-396.
- [5] 肖生春, 肖洪浪, 蓝永超, 等. 近50 a来黑河流域水资源问题与流域集成管理[J]. 中国沙漠 2011, 31(2): 529-535.
- [6] 王钧, 蒙吉军. 黑河流域近60年来径流量变化及影响因素[J]. 地理科学 2008, 28(1): 83-88.
- [7] 蓝永超, 丁永建, 康尔泗. 近50年来黑河山区汇流区温度及降水变化趋势[J]. 高原气象 2004, 23(5): 723-727.
- [8] 李林, 王振宇, 汪青春. 黑河上游地区气候变化对径流量的影响研究[J]. 地理科学 2006, 26(1): 40-46.
- [9] 张凯, 王润元, 韩海涛, 等. 黑河流域气候变化的水文水资源效应[J]. 资源科学 2007, 29(1): 77-83.
- [10] 杨明金, 张勃, 王海青, 等. 黑河流域1950—2004年出山径流变化规律分析[J]. 资源科学 2009, 31(3): 413-419.
- [11] 肖洪浪, 程国栋, 李彩芝, 等. 黑河流域生态—水文观测试验与水—生态集成管理研究[J]. 地球科学进展, 2008, 23(7): 666-670.
- [12] 李海燕, 王可丽, 江灏, 等. 黑河流域降水的研究进展与展望[J]. 冰川冻土 2009, 31(2): 334-341.
- [13] 蓝永超, 丁永建, 刘进琪, 等. 全球气候变暖情景下黑河山区流域水资源的变化[J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 863-868.
- [14] 杨明金, 张勃, 张华, 等. 1944—2004年黑河出山径流变化及其对区域水资源安全的可能影响[J]. 水土保持通报 2009, 29(6): 24-28.
- [15] 李栋梁, 刘洪兰. 黑河流量对祁连山气候年代际变化的响应[J]. 中国沙漠 2004, 24(4): 385-391.
- [16] 李新, 程国栋, 吴立宗. 数字黑河的思考与实践 1: 为流域科学服务的数字流域[J]. 地球科学进展 2010, 25(3): 297-305.
- [17] 牛最荣, 赵文智, 陈学林, 等. 黑河流域中西部子水系水资源分布特征研究[J]. 冰川冻土 2010, 32(6): 1194-1201.
- [18] 马宏伟, 王乃昂, 李卓仑. 近50年石羊河流域气候变化的R/S分析[J]. 兰州大学学报: 自然科学版 2010, 46(4): 42-45.
- [19] Liu J S, Hayakawa N, Lu M, et al. Winter streamflow, ground temperature and active-layer thickness in Northeast China[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2003, 14(1): 11-18.
- [20] 巩同梁, 刘昌明, 刘景时. 拉萨河冬季径流对气候变暖和冻土退化的响应[J]. 地理学报 2006, 61(5): 519-526.
- [21] 牛丽, 叶柏生, 李静, 等. 中国西北地区典型流域冻土退化对水文过程的影响[J]. 中国科学(D): 地球科学 2011, 41(1): 85-92.
- [22] 王建, 李硕. 气候变化对中国内陆干旱区山区融雪径流的影响[J]. 中国科学(D): 地球科学 2005, 35(7): 664-670.
- [23] 阳勇, 陈仁升, 吉喜斌, 等. 黑河高山草甸冻土带水热传输过程[J]. 水科学进展 2010, 21(1): 30-35.
- [24] 李宗义, 杨建才, 李荣庆, 等. 祁连山中段人工增雨雪的气候分析及其有利天气[J]. 干旱气象 2006, 24(1): 23-27.
- [25] 康尔泗, 程国栋, 蓝永超, 等. 西北干旱区内陆流域出山口径流变化趋势对气候变化响应模型[J]. 中国科学(D): 地球科学 1999, 29(S1): 47-54.

(下转第16页)

(4) 在土壤水分渗透的过程中,入渗速率主要受土壤孔隙组成、机械组成和团聚体组成综合影响。机械组成成分维越大,质地越细,入渗率越小;团聚体组成成分形维数越小,结构和稳定性越好,入渗率越大;孔隙组成成分形维数越大,孔隙分布越均一,入渗率越大。入渗平均速率大小排列顺序依次为:高山栎林 > 灌竹林 > 阔叶林 > 冷杉林 > 草甸。

(5) 土壤颗粒分形维数 D 能够很好地表征土壤的结构性状,这对进一步建立岷江亚高山林土壤分形维数与土壤结构、土壤肥力特征之间的定量关系模型,对深入探讨分形理论在土壤结构上的利用和揭示土壤肥力特征具有重大意义。

[参 考 文 献]

- [1] 苏里坦,宋郁东,陶辉. 不同风沙土壤颗粒的分形特征[J]. 土壤通报, 2008, 39(2): 244-248.
- [2] 王德,傅伯杰,陈利顶,等. 不同土地利用类型下土壤粒径分形分析:以黄土丘陵沟壑为例[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 3081-3089.
- [3] 吴承祯,洪伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究[J]. 土壤学报, 1999, 36(2): 162-167.
- [4] 程先富,史学正,王洪杰. 红壤丘陵区耕层土壤颗粒的分形特征[J]. 地理科学, 2003, 12(5): 617-622.
- [5] Michel R, Garrison S. Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties: I. Theory [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1991, 55(5): 1231-1238.
- [6] Pefect E, Mchaughlin N B, Kay B D, et al. An improved fractal equation for the soil water retention curve [J]. Water Resource Res., 1996, 32(2): 281-287.
- [7] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle size distributions: analysis and limitations [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1992, 56(2): 362-369.
- [8] 吴彦,刘庆,乔永康,等. 亚高山针叶林不同恢复阶段群落物种多样性变化及其对土壤理化性质的影响[J]. 植物生态学报, 2001, 25(6): 648-655.
- [9] Scott W T, Stephen W W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation [J]. Soil Sci. Soc. Am., 1989, 53(4): 987-996.
- [10] 贾晓红,李新荣,李元寿. 干旱沙区植被恢复过程中土壤颗粒分形特征[J]. 地理研究, 2007, 26(3): 518-524.
- [11] 张社奇,刘云鹏,刘建军,等. 黄土高原油松人工林地土壤颗粒的分形特征[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2007, 35(11): 151-155.
- [12] 王德,傅伯杰,陈利顶,等. 不同土地利用类型下土壤粒径分形分析:以黄土丘陵沟壑为例[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 3081-3089.
- [13] 苏永中,赵哈林. 科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 72-74.
- [14] 周先容,陈劲松. 川西亚高山针叶林土壤颗粒的分形特征[J]. 生态学杂志, 2006, 25(8): 891-894.
- [15] 姚健,吴尧,薛建辉,等. 岷江上游 3 种亚高山森林土壤蓄水和渗透能力比较[J]. 林业科技开发, 2009, 23(6): 44-47.
- [16] 王玉杰,王云琦,齐实,等. 重庆缙云山典型林地土壤分形特征对水分入渗影响[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(2): 73-78.
- [17] 黄冠华,詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用[J]. 土壤学报, 2002, 29(4): 490-496.
- [18] 郝振纯,李丽,王加虎,等. 分布式水文模型理论与方法[M]. 北京:科学出版社, 2010: 161-179.
- [19] 马宏伟,王乃昂. 近 50 年石羊河出山口径流对气候变化的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(1): 113-117.
- [20] 施雅风,沈永平,李栋梁,等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-162.
- [21] 施雅风,沈永平,李栋梁,等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-162.

(上接第 11 页)

- [26] 吴倩如,康世昌,高坛光,等. 青藏高原纳木错流域扎当冰川度日因子特征及其应用[J]. 冰川冻土, 2010, 32(5): 891-897.
- [27] 陈仁升,刘时银,康尔泗,等. 冰川流域径流估算方法探索:以科其喀尔巴西冰川为例[J]. 地球科学进展, 2008, 23(9): 942-951.
- [28] Arnaud P, Bouvier C, Cisneros L, et al. Influence of rainfall spatial variability on flood prediction [J]. Journal