新疆内陆河流域融雪期积雪深度 变化影响因素研究

王芹芹¹, 雷晓云¹, 朱连勇², 木沙·如孜¹, 汪福昌³

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆塔里木大学 水利与建筑工程学院, 新疆 阿拉尔 843300; 3. 新疆喀什地区伽师县水利局, 新疆 喀什 844300)

摘要: 采用因子分析法结合多元线性回归分析法对影响融雪期积雪深度变化的因素进行分析。结果表明:融雪期积雪深度与热能因子(地表温度,气温,净辐射)呈负相关,与水汽因子(水汽压,相对湿度,降雨)呈弱的负相关。空气流动因子(日均风速)对其影响较微弱;在此基础上对各因素的影响强弱,按大小进行排序,各因素对融雪期积雪深度变化影响的排序为:热能因子>水汽因子>空气流动因子。建立的回归方程通过了显著性检验表明:利用因子分析法与多元线性回归分析法结合,分析融雪期积雪深度的变化影响因素是可行的。

关键词: 融雪期; 积雪深度; 因子分析; 多元线性回归

中图分类号:TV121.6 文献标识码:A 文章编号:1672-643X(2012)06-0027-05

Study on influence factors of snow depth change during period of snow melting in inland river basin of Xinjiang

WANG Qinqin¹, LEI Xiaoyun¹, ZHU Lianyong², MUSHA · Ruzi¹, WANG Fuchang³

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;
2. College of Water Conservancy and Architecture Engineering, Tarim University, Arlaer 843300, China;
3. Jiashi County Water Conservancy Bureau in Kashi District of Xinjiang, Kashi 844300, China)

Abstract: Combining factor analysis method with multiple linear regression analysis method, the paper analyzed the influence of some factors on the change of snow depth during snow melting. The results show that snow depth in the period of snow melting negatively correlates with the thermal factors such as surface temperature, air temperature and net radiation, and weakly negatively correlates with vapor factors such as vapor pressure, relative humidity and precipitation. Air current factor such as daily average wind speed has weaker influence on snow depth. The sequence of various factors which affect snow depth change from big to small is thermal energy, water vapor and air current factors. The significant examination to the regression equation showed that it is feasible to use the method to analyze the factors which affect the change of snow depth during snow melting.

Key words: snow melting period; snow depth; analysis of influence factors; multiple linear regression

1 研究背景

积雪作为地表最为活跃,且具有多重属性的自然因素,早已引起众多地学科学家的关注与重视。积雪是气候的产物,积雪深度是估算雪水当量、研究地表辐射平衡研究、流域水量平衡和春季融雪径流模拟的重要参数^[1-3],积雪深度又是反映积雪的水文冷却效应的基础,一直为水文、气象学家所关注。

天山冰雪覆盖区是新疆、尤其是北疆许多河流

的发源地,冰雪融水是新疆干旱区农业的命脉,而区域气候变化导致的积雪变化对春、夏季河川径流的影响将会对干旱区经济和脆弱生态环境产生严重的后果,甚至会导致旱涝灾害的频繁发生,这些影响在干旱区尤为突出^[4-8]。高山雪融水是新疆内陆河流水资源的主要来源^[9]。在终年积雪的内陆河山区,气温是内陆河流域径流变化十分重要的影响因素^[10-11]。然而,融雪过程是一个复杂的物理过程,积雪深度的变化作为积雪融化过程中的特征变

收稿日期:2012-09-05; 修回日期:2012-09-19

基金项目:国家自然科学基金(U1178301)资助;新疆水文水资源重点学科建设项目

作者简介:王芹芹(1986-),女,新疆沙湾人,在读硕士研究生,研究方向为:融雪径流及水文模拟。

通讯作者:雷晓云(1961-),女,湖南长宁人,教授,博士生导师,从事水资源利用与水文模拟。

量^[12],除气温以外,还与其他因素密切相关,如:净辐射、地表温度、相对湿度、风速、降雨量等。目前国内外的主要研究都集中在已有模型^[13]或者遥感^[14]基础之上,对积雪融化过程中的积雪深度变化影响因素研究较少,不能为模型转化提供有效参数,很多不能达到实际需求的精度。如果能将这些影响因素对融雪期积雪深度变化的影响的大小,强弱进行排序,将为建立分布式流域的分布式水文模型提供模型转化参数。对于解决内陆河流域工农业用水矛盾,以及该地区的防洪减灾,意义重大^[15]。以期为新疆内陆河流的融雪对水文、气候、径流的影响提供了合理的预报。

2 研究方法

2.1 因子分析法

因子分析 (Factor Analysis) 是从多个变量中选出少数几个综合变量的一种降维多元统计分析方法,用以达到数据简化 (Data Reduction) 的目的。在分析处理多变量问题时,变量间往往相关极为密切,使得观测数据所反映的信息又重叠,将几个变量变为少数几个潜在因子,既能减少变量之间的内在联系,又能减少变量个数。几个潜在因子能高度概括数据中的信息,又同样再现变量之间内在联系。

设有 n 维可观测随机向量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 用于样本评价,为排除量纲的影响,先对数据标准化处理,其因子分析的一般模型为:

$$\begin{cases} Z_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n + \varepsilon_1 \\ Z_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n + \varepsilon_2 \\ \dots \\ Z_m = a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n + \varepsilon_m \end{cases} \quad (1)$$

模型中, $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为公共因子, $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m$ 为特殊因子,其中包括随机误差, a_{ij} 为因子载荷,是第 i 个原有变量在第 j 个因子变量上的负荷,即 x_j 在第 j 个变量上的重要性, a_{ij} 的绝对值越大, x_j 和 z_j 的关系性越强。

2.2 多元线性回归模型

在现实问题研究中,因变量的变化往往受几个重要因素的影响,可采用 2 个或 2 个以上的影响因素作为自变量来解释因变量的变化,即多元回归。当多个自变量与因变量之间是线性关系时,所进行的回归分析就呈多元线性回归。对于一个相互关联的系统,有一个因变量 y 与 n 个自变量 $x_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 间存在线性关系,可设定多元线性回归模型形式为:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + e \quad (2)$$

式中: b_i 代表偏回归系数, b_0 为截距, e 为随机误差。

3 主因子的提取

本文所使用的数据来源于位于新疆伊犁地区新源县巩乃斯河畔巩乃斯河流域河源布设的自动气象站 2005 - 2010 年每半小时的观测数据,观测项目包括:雪深、空气温度、净辐射、水汽压、相对湿度、平均风速、地表温度、降雨量。其中,雪深、空气温度、净辐射、水汽压、相对湿度、平均风速。地表温度是将融雪期内每半小时的观测数据转化为日平均,降雨量是将每半小时的观测数据转化为日降雨量。

本文开始试图以多元线性回归的方法建立各年融雪期内空气温度,净辐射,水汽压等 7 个观测因子与雪深的回归方程,并进一步分析各因素的影响大小,但分析发现,各年建立的回归方程虽然通过了 F 检验(整个方程的有效、回归关系显著),但有些未通过 T 检验(各个参数在回归方程中的显著性)。本文认为检验未通过产生的原因是选取的各个独立变量间存在着多重共线性,即一些自变量之间存在线性关系,也就是说气温、净辐射、水汽压等这些观测因子之间不互相独立,则说明直接使用多元线性回归法计算得到的回归系数并不代表着它们各自与变量之间的关系,而是它们对因变量的共同影响,这将影响回归系数估计的正确性。因此,本文决定先使用因子分析法将各个因子利用因子模型排除各个观测因子的相关性干扰,然后建立各因子与积雪深度的回归方程,最后进行融雪期积雪深度变化的影响因子分析评价。

将各个观测因子经过标准化处理(排除量纲影响)后,应用统计软件 SPSS 18.0 (Statistical Program for Social Sciences) 采用方差最大法,对因子载荷矩阵实行正交旋转,得到因子载荷矩阵。经过不断地分析调整,最终选取 3 个主因子,从 3 个因子来衡量各因素对积雪融化深度的影响评价,这 3 个主因子各年对样本方差的贡献和均 > 85%,说明用这 3 个因子可以代表影响积雪融化深度的影响因子。2005 - 2010 年的因子荷载矩阵如表 1 所示。

从表 1 可以看出,主因子 1 在 x_1, x_2, x_6 上荷载较大,集中反映气温,净辐射,地表温度的信息,是热能的公共因子,综合 6 年的平均值,主因子 1 对全部初始变量的方差贡献达 58.726%,是影响积雪融化深度的主要方面,主因子 2 在 x_3, x_4, x_7 上荷载较大,集中反映水汽压,相对湿度,降雨的信息,是水汽的

表 1 2005 - 2010 年各观测因子旋转后因子荷载矩阵表

年份	因子	空气温度 x_1	净辐射 x_2	水汽压 x_3	相对湿度 x_4	平均风速 x_5	地表温度 x_6	降雨 x_7
2005	热能因子(因子 1)	0.955	0.912	0.639	-0.019	0.032	0.891	-0.044
	水汽(因子 2)	0.148	0.095	0.690	0.905	-0.217	-0.038	0.884
	空气流动(因子 3)	-0.052	-0.082	-0.223	-0.215	0.962	0.295	-0.043
2006	热能因子(因子 1)	0.863	0.935	0.435	-0.098	-0.084	0.877	0.168
	水汽(因子 2)	0.155	-0.048	0.707	0.897	-0.192	0.203	0.860
	空气流动(因子 3)	0.408	0.151	0.466	0.261	-0.911	-0.185	-0.02
2007	热能因子(因子 1)	0.951	0.862	0.574	0.053	-0.011	0.922	0.066
	水汽(因子 2)	0.094	0.063	0.070	0.857	-0.177	0.135	0.945
	空气流动(因子 3)	0.087	-0.347	-0.171	-0.429	0.968	0.113	0.040
2008	热能因子(因子 1)	0.922	0.749	0.522	0.291	-0.042	0.850	-0.206
	水汽(因子 2)	-0.112	-0.388	0.825	0.917	-0.178	0.253	0.862
	空气流动(因子 3)	-0.037	-0.230	-0.111	-0.095	0.962	0.151	-0.154
2009	热能因子(因子 1)	0.910	0.904	0.667	-0.149	-0.481	0.715	-0.253
	水汽(因子 2)	0.198	0	0.706	0.945	-0.282	-0.262	0.826
	空气流动(因子 3)	-0.023	0.023	0.016	-0.037	0.953	-0.186	-0.145
2010	热能因子(因子 1)	0.855	0.848	0.458	0.204	-0.185	0.853	-0.247
	水汽(因子 2)	0.004	-0.143	0.737	0.848	0.100	0.100	0.785
	空气流动(因子 3)	-0.203	-0.169	-0.35	-0.145	0.964	-0.003	0.169

公共因子,综合 6 年的平均值,主因子 2 对全部初始变量的方差贡献达 25.935%,在因子排序中占第二位,主因子 3 在 x_5 上的荷载较大,集中反映平均风速的信息,是空气流动的公共因子,综合 6 年的平均值,主因子 3 对全部初始变量的方差贡献达 3.989%,是对积雪融化深度影响最弱的因子。累计达到 88.650%,符合主因子分析中各主因子累积贡献率大于 85% 的要求,这 3 个主因子就包含了 7 个变量的绝大部分信息,因此提取 3 个因子是合适的。

4 建立观测影响因子与提取的主因子的因子得分模型

为建立观测的影响因子(气温,净辐射,水汽压,相对湿度,平均风速,地表温度,降雨)与上述提取的主因子(热能因子,水汽因子,空气流动因子)之间的因子得分模型,将统计软件 SPSS 18.0 得到的分析数据结果中的因子得分函数与方差贡献率相乘作为系数代入式(1),得到 2005 - 2010 年融雪期内各影响因子 ($x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7$) 与主因子 (z_1, z_2, z_3) 的因子得分模型。因子得分模型的系数矩阵如表 2 所示。

5 建立融雪期积雪深度与主因子的回归方程及影响因子分析

将 2005 年 - 2010 年融雪期内所观测每日的影响因子 ($x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7$) 代入表 1 建立的因

子得分模型,得到 2005 - 2010 年融雪期内的每日主因子 (z_1, z_2, z_3),作为进一步多元线性回归方法过程中选取的自变量,将融雪期内每日的积雪深度作为应变量,利用 SPSS 18.0 软件,对数据进行线性回归分析,得到如下各年融雪期积雪深度与各影响因子的回归方程:

$$2005 \text{ 年: } h = -2.122z_1 - 0.191z_2 - 0.066z_3$$

$$R^2 = 0.878$$

$$2006 \text{ 年: } h = -2.273z_1 - 1.058z_2 - 0.498z_3$$

$$R^2 = 0.845$$

$$2007 \text{ 年: } h = -2.390z_1 - 1.719z_2 - 0.243z_3$$

$$R^2 = 0.819$$

$$2008 \text{ 年: } h = -1.762z_1 - 0.718z_2 - 0.057z_3$$

$$R^2 = 0.803$$

$$2009 \text{ 年: } h = -2.418z_1 - 1.274z_2 + 0.279z_3$$

$$R^2 = 0.847$$

$$2010 \text{ 年: } h = -2.010z_1 - 1.037z_2 + 0.385z_3$$

$$R^2 = 0.866$$

式中: h 为各年融雪期的积雪深度的变化值, m ; z_1 代表热能因子; z_2 代表水汽因子; z_3 代表空气流动因子。

以上方程均通过了 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验,表明方程是有效的。根据标准系数法^[16]从以上方程的系数可以看出,积雪在融雪期的深度变化随着热能因子(气温,净辐射,地表温度)的增大而减少,也与水汽因子(水汽压,相对湿度,降雨)呈现弱的负相关。而空气流动因子(平均风速)对其影响极为微弱。

表2 2005-2010年各观测因子得分模型的系数矩阵表

年份	因子	空气温度 x_1	净辐射 x_2	水汽压 x_3	相对湿度 x_4	平均风速 x_5	地表温度 x_6	降雨 x_7
2005	热能因子(因子1)	11.738	13.885	7.627	-2.823	0.969	12.599	-3.540
	水汽(因子2)	-0.246	-4.682	8.318	13.741	5.299	-0.0628	15.096
	空气流动(因子3)	-2.528	-6.953	-2.444	2.191	40.033	10.661	9.650
2006	热能因子(因子1)	11.351	14.490	2.390	-5.730	4.120	14.600	0.220
	水汽(因子2)	-2.980	-4.545	7.550	14.150	4.850	3.162	15.354
	空气流动(因子3)	4.340	0.517	3.520	0.1148	-15.590	-6.960	-5.61
2007	热能因子(因子1)	14.530	13.160	5.300	-4.050	1.093	13.847	4.170
	水汽(因子2)	-1.620	-5.165	8.342	11.857	4.370	-0.550	17.050
	空气流动(因子3)	2.014	-5.323	0.407	-3.068	15.191	2.643	5.119
2008	热能因子(因子1)	13.701	11.310	10.802	2.104	1.931	12.321	-5.171
	水汽(因子2)	-3.24	6.201	-8.012	13.092	1.512	3.202	12.731
	空气流动(因子3)	-0.060	-3.683	0.105	0.764	14.105	3.500	-0.659
2009	热能因子(因子1)	12.801	13.673	6.752	-6.751	-6.462	11.843	-2.381
	水汽(因子2)	0.663	-2.361	8.900	14.731	-2.412	-2.423	-5.626
	空气流动(因子3)	-0.167	0.636	-0.300	-0.127	-83.28	-2.250	11.87
2010	热能因子(因子1)	13.351	13.352	8.190	0.622	8.861	15.302	-3.411
	水汽(因子2)	-0.782	-2.861	5.751	11.973	1.641	-0.515	11.702
	空气流动(因子3)	0.874	1.212	-2.304	-0.9881	16.413	4.302	2.314

并且由系数可以看出,空气流动因子(风速)对融雪期积雪深度的影响比较复杂^[12],有时与积雪深度正相关,有时与积雪深度负相关。

对以上各回归方程进一步分析,使用影响因子分析法^[17]:

$$C = ST_i b_i / e_i \quad (3)$$

式中: C 为影响因子; ST_i 为各因子正负相关影响的符号,对于融雪期的热能影响因子和水汽影响因子 $ST_i = -1$; 对于空气流动这个影响因子 $ST_i = 1$; b_i 为方程中不同要素的回归系数; e_i 为各个回归系数的标准误差值。通过计算各年融雪期积雪深度变化的影响因子见表3。

表3 2005-2010年融雪期积雪深度变化的影响因子

年份	z_1 (热能因子)	z_2 (水汽因子)	z_3 (空气流动因子)
2005	14.241	0.936	0.443
2006	13.139	1.712	0.515
2007	8.819	1.891	0.453
2008	4.649	1.362	-0.535
2009	13.000	3.661	-0.263
2010	13.400	3.400	-0.562
平均	11.208	2.160	0.462

因为影响因子 C 越大, b_i 所对应的参变量对回归方程的贡献越大,即对因变量的影响程度越大,所以根据分析可知:各年融雪期积雪的深度变化影响因子中,热能的影响因子 z_1 最大,6年内的影响因子平均值达到11.208,其次是水汽的影响因子 z_2 ,6年内的影响

因子平均值达到2.160,最弱的是空气流动因子 z_3 的影响。6年内的影响因子平均值为0.462。

6 结论与讨论

(1)由于融雪期内所观测得到各个因素之间的相关性较强,直接使用多元回归分析方法不适于研究其对融雪期积雪深度的影响。如果想尽可能利用所有的观测因子,本文进行因子分析后可以总结成3个公共因子,最大方差极大法旋转得到的矩阵也可以很好地解释公共因子的物理意义,可继续进行分析。

(2)本文使用因子分析法将融雪期影响积雪深度变化的7个观测因子进行了分类,其影响因子中,热能因子的影响程度最大,也就是说,在积雪融化过程中,主要受地表温度,空气温度,净辐射的影响。水汽因子即水汽压,相对湿度,降水对积雪深度的影响位列第二,并与融雪期积雪的深度呈现弱的负相关。空气流动因子即平均风速的影响最弱。并且比较复杂,有的与积雪深度正相关,有的负相关。因此,可以看出,影响因子方法对分析影响融雪期积雪深度的主要因素显示出较好效果,其把影响融雪期积雪深度的主要因子及其影响程度定量地表达了出来。从方法和结果上来看,比普通相关更具“透明度”。在资料有限的新疆内陆河山区流域,可作为一种有效分析手段借鉴使用。

(3)本文使用因子分析法结合多元回归分析方法建立的融雪期积雪深度与热能,水汽,空气流动三

个因子之间回归方程均通过了有效性和显著性检验,表明所建立回归方程是合理有效的。另外,此回归模型所引进的各变量因子存在一定的局限性,导致模型预报有偏差,但总体效果尚好,方法可行。对于积雪融化过程所涉及的各种相关变量要素,在今后的研究中有待进一步探讨。

致谢:衷心感谢中国科学院新疆生态与地理研究所的李兰海老师在论文中给予的无私帮助。

参考文献:

- [1] Robinson D A, Dewey K F, Heim R R. Global snow cover monitoring an update[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1993, 74(9):1689-1696.
- [2] 郭玲鹏,李兰海. 雪深度及季节冻土温度对气温变化的响应[J]. *资源科学*, 2012, 34(4):636-643.
- [3] 冯学智,柏延臣,史正涛,等. 北疆地区积雪深度的克里格内插估计[J]. *冰川冻土*, 2000, 22(4):358-361
- [4] 魏月,谢国辉. 北疆区域积雪深度变化的遥感监测研究[D]. 新疆师范大学硕士学位论文, 2010.
- [5] 仇家琪,孙希华. 天山积雪初步研究[J]. *干旱区地理*, 1992, 15(3):9-21.
- [6] 张一驰,李宝林,包安明. 开都河流域融雪径流模拟研究[J]. *中国科学(D辑 地球科学)*, 2006, 36(增刊II):24-32.
- [7] 杨绍富,刘志辉. 融雪过程中水热耦合实验研究——以军塘湖流域为例[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2009.
- [8] 岳春芳,何训江,艾丽米古丽·艾萨. 金沟河流域水权分配及转让研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2012, 23(3):48-50.
- [9] 唐尔泗,程国栋,董增川. 中国西北干旱区冰雪水资源与出山径流[M]. 北京:科学出版社, 2002:1-2.
- [10] 刘艳,李杨. 玛纳斯河流域融雪径流与积雪-气象因子分析[J]. *水土保持研究*, 2010, 17(2):145-149.
- [11] 兰跃东,康玲玲,董飞飞,等. 汾河流域气候变化及其对径流影响探讨[J]. *水资源与水工程学报*, 2012, 23(2):70-76.
- [12] 杨建平,丁永建,长江源区小冬克玛底冰川区积雪消融特征及对气候的响应[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(2):258-264.
- [13] 薛天柱,马灿,魏国孝,等. 甘肃梨园河流域 SWAT 径流模拟与预报[J]. *水资源与水工程学报*, 2011, 22(4):61-65.
- [14] 张尧,冯学智. NDVI 对 NDSI 积雪信息提取阈值的影响研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2012, 23(4):176-178+184.
- [15] 李慧,雷晓云. SWAT 模型在新疆内陆河流域水资源模拟中的研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2010.
- [16] 王国强,秦富仓. 满洲里市积雪动态变化及其与主要气候因子的关系分析[J]. *内蒙古农业大学学报*. 2011, 32(4):71-74.
- [17] 丁永建,叶柏生,刘时银,等. 祁连山区流域径流影响因子分析[J]. *地理学报*, 1999, 54(5):431-437.
- [8] Arnold W R, Santore R C, Cotsifas J S. Predicting copper toxicity in estuarine and marine waters using the Biotic Ligand Model[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 50(12):1634-1640.
- [9] 陈中智,朱琳,姚琨,等. Ca^{2+} 与 Pb^{2+} 相互作用对斑马鱼胚胎毒性效应的影响[J]. *环境科学*, 2009, 30(4):1205-1209.
- [10] 陈中智,朱琳,姚琨,等. 两种生物配体模型(BLM)预测 Zn 对大型蚤急性毒性的比较[J]. *安全与环境学报*, 2008, 8(4):5-8.
- [11] 陈中智,朱琳,李燕,等. 生物配体模型的适用性研究[J]. *环境保护科学*, 2007, 33(6):81-84.
- [12] 吕怡兵,李国刚,宫正宇,等. 应用 BLM 模型预测我国主要河流中 Cu 的生物毒性[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(12):2080-2085.
- [13] 郑丙辉,王春艳,陈浩. 运用生物配体模型预测中国典型河流中铜对青鳉鱼的生物急性毒性[C]//. 2011 中国环境科学学会学术年会论文集(第一卷). 乌鲁木齐:中国环境科学出版社, 2011:579-586.

(上接第 26 页)

- [3] 龙爱民,赵迪,冷科明,等. 夏季沿岸上升流对珠江河口水域中铜的形态分布与生物毒性的影响[J]. *环境科学研究*, 2003, 16(4):32-35.
- [4] Paquin P R, Santore R C, Wu K B, et al. The biotic ligand model: a model of the acute toxicity of metals to aquatic life[J]. *Environmental Science and Policy*, 2000, 3(S1):175-182.
- [5] Paul R P, Joseph W G, Simon A, et al. The biotic ligand model: a historical overview[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part C*, 2002, 133(1/2):3-35.
- [6] 王学东,马义兵,华璐,等. 环境中金属生物有效性的预测模型——生物配体模型研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2006, 1(3):193-202.
- [7] Van Genderen E, Gensemer R, Smith C, et al. Evaluation of the biotic ligand model relative to other site-specific criteria derivation methods for copper in surface waters with elevated hardness[J]. *Aquatic Toxicology*, 2007, 84(2):279-291.