

长江源区水循环机理探讨

陈进

(长江科学院 院长办公室,武汉 430010)

摘要:长江源地区由于特殊的地理和气候环境,其水循环机理具有独特性,根据长江源地区气候、降水、冰川和冻土特点,分析了长江源大汽水、固态水和液态水三水转换机理。研究结果表明:长江源区虽然降水量少,但储存的固态水多,其独特的三水特点及转换机理构建了长江源地区脆弱的生态系统,一旦水循环机理变化,就会显著影响长江源的生态环境。

关键词:长江源区;降水;水循环;生态系统

中图分类号:TV211.1

文献标志码:A

文章编号:1001-5485(2013)04-0001-05

长江源地处青藏高原腹地,平均海拔在4 000 m以上,面积13.77万 km²(直门达水文站以上),占我国三江源地区总面积的43.6%。长江源地貌特征是北、西、南分别被昆仑山、乌兰乌拉山及祖尔肯乌拉山、唐古拉山所围限,东北部被巴颜喀拉山阻拦,仅东南部有逐渐走低河谷地势,是长江和澜沧江源区的出口。长江源区的平均降水量和径流深分别为398 mm,113 mm,是长江流域降水量和径流量最少的地区,但由于该地区海拔高、气温低,常年有大量冰川、冰盖、雪盖和冻土等大量固态水存在,而且四周环山,高原内部地势平缓,沼泽、湖泊湿地发育,保存着大量液态水,所以,长江源地区水循环的特点与地球南极类似,外来水和流出水均不多,但存水量大,是干燥但水量丰富的地区,故包括长江源在内的三江源地区有“中华水塔”之称。长江源的大汽水、液态水和固态水(以下简称三水)转换机理与低海拔地区有明显区别,其水循环规律及变化不仅受全球气候变化和人类活动双重影响,而且深刻地影响着江源地区生态系统^[1-3]。因此,探讨长江源区水循环机理及变化规律具有十分重要的科学价值和生态环境保护的意义。

1 长江源区的三水

1.1 气候和大汽水

长江源区由于地势高亢,南部被喜马拉雅山和

唐古拉山阻拦,南来的印度洋暖湿气流不能直接北上,使长江源区气候成为典型的高原大陆性气候,主要特征是:①年内温差小,基本上只有冬夏两季,冬冷夏热对应着干湿两季;②冬季长达9~10个月,夏季短,仅2~3个月,年平均气温-5.3~3.3℃,2/3地区年平均气候低于0℃,使植被年生长期仅3个月左右;③日温差大,日照长,辐射强,地面温室效应比平原地区低;④大风及风暴多,地面的风力及水力侵蚀同样强烈。

长江源大气中的水汽主要由当地地表水蒸发和外来水汽流入2部分组成,至于两者各占多少比例,学者有不同的看法,西藏那曲的观测结果表明^[4]:6—9月间当地水蒸发占大气中的水汽71%,而外来水汽仅占29%,这一数据的可靠性虽然值得进一步验证,但也说明了进入该地区的外来水汽所占比例比平原区显然少很多。外来水汽占降水的比例虽然不高,但南部外来的暖湿气流对于当地降水影响仍然较大。长江源区外来暖湿气流主要受东南、西南气流影响,其中东南气流向西延伸到河西走廊一带,而西南气流分2支进入本区,一支从孟加拉湾沿澜沧江、金沙江河谷进入长江源区,另一支沿雅鲁藏布江下游河谷进入本区,影响到羌塘高原东部及柴达木盆地。气流带来的大量水汽沿着河流峡谷通道进入本区,遇本地水汽和气候条件合适就会形成降水。

长江源区空中水汽输送和水汽含量有明显的季节变化和地理分布特征:冬季在西北气流控制下,虽

通过雅鲁藏布江、金沙江、岷江、大渡河、雅砻江有一些水汽输送到高原腹地,但水汽含量仍是一年中最少季节;春季西风开始减弱,气温上升,水汽含量因融冰蒸发而缓慢增加;夏季太平洋副高压北抬西伸,配合高原低压将低纬度湿热空气源源不断地吹向高原,高原空气中水汽含量迅速增加,7月出现极大值,也是降水最集中时期;秋季西风带明显南移,同时夏季风环流南撤减弱,水汽含量较春季更快地下降。从地区分布来看,水汽最多在东南长江源区出口直门达地区,向西北逐渐减少,到五道梁西北地区以后,水汽最少,降水最少,呈现出典型的高原干冷大陆型气候特点。

1.2 长江源区的降水

长江源区年平均降水量由西北向东南在 284 ~ 511 mm 之间变化,其中 6—9 月降水量占全年的 80%,比平原区时间分布更不均匀。长江源水面蒸发量在空间上分布与降水相反,由东南向西北递增,在 1 278 ~ 1 631 mm^[5] 之间,蒸发量主要集中在 5—9 月的融冰期,占全年蒸发量的 56%,冰冻期(10 月至次年 4 月)蒸发量占全年的 44%。

长江源区降水有以下特点:①由于年平均气温在 0℃ 以下,年降水量中降雪量占有较大的比重,越向西北,降雪比例越高,甚至在夏季都会出现降雪;②降水大多为强度不大的阵性降水,持续多天的降水过程很少,基本没有暴雨过程,所以,降水直接产流比例较低;③夜雨多,占到总降水量的 55% ~ 66%^[5]。这主要与地形和气候特点有关,傍晚,地面温度开始下降,山坡上的地面空气冷却后,密度增大,沿山坡下滑到河谷,使河谷原来的暖湿空气受到冲击而上升,使水汽逐渐凝结成云,产生降雨。云顶又由于强烈反射而逐渐冷却,冷气又会沿山坡下滑,这样就形成了一个垂直环流。天亮后,山坡的增温较快,空气停止下滑,降雨也就停止。

1.3 长江源区的径流

长江源区多年平均径流深 113 mm,从西北到东南为 50 ~ 300 mm 不等,是长江流域产流量最少的地区。从地区分区来源看,长江正源沱沱河、北源楚玛尔河、南源当曲三源合计年平均径流量占长江源区的 36%,其中沱沱河和朵儿曲(布曲支流)的贡献率 13%,楚玛尔河贡献率 2%,布曲(当曲支流)贡献率 6%,当曲贡献率 15%,而雁石平、得列楚卡、沱沱河和楚玛尔河水文站以下至直门达水文站的通天河年平均流量占其余的 64%。直门达以上的长江源水系多年平均流量 408 m³/s,径流量 128.7 亿 m³。

长江源区总体为外流水系,河川径流以高山冰

雪融水、地下水补给和降水等 3 种形式补给,三者大约分别占年径流量的 45%,40% 和 15%,前两者合计占到 85%,是江源河流径流的主要来源。原因是由于高原基本没有暴雨或者持续性的降水过程,大部分降水被蒸发、土壤吸收或者变为雪盖缓慢蒸发,河流多数径流来自冰雪融化,降水直接产流比例较少。在夏季,尽管没有暴雨过程,但由于冰雪融解量大,江源河道坡降大,特别是通天河河道中水流流速较大,湍急的水流携带大量泥沙,很像中下游地区河流的洪水过程,水流携沙及冲刷能力很强。

1.4 长江源区的储留水

长江源区由于径流总量小,每年向金沙江提供的径流仅占长江总径流量的 1.3%,但保留在冰川、冻土和湖泊中的水量巨大,最为显著的特点是储留着大量固态水,也称为“固体水库”。

(1) 冰川及雪盖:长江源冰川总面积 1 247 km², 627 条^[5],折合成水量约 840 亿 m³,相当于直门达年径流量的 6.5 倍^[6]。一般情况下,夏季冰川和雪盖减少,冬季增加。如果气候进入变暖周期,则冰川和雪盖面积会逐渐减少,在短时间内,会增加江源河流径流量,但长时间气候变暖会对生态环境产生巨大的影响。

(2) 冻土水:长江源冻土层厚 10 ~ 120 m,最厚可达 300 m,冻土地下冰储量估计达数万亿 m³,季节性融化深度 1 ~ 4 m,是地下水的来源之一。虽然冻土中存在大量水,但这些水一般不能被利用,但常年冻土层对维持江源生态系统有着极重要的作用。冻土融解层的厚度不仅受气候变化影响,而且受人类活动影响,如公路和铁路建设、放牧活动等。

(3) 沼泽水:青藏高原是我国第二大沼泽集中分布区,形成原因主要是草甸或草原的沼泽化,其次为湖泊沼泽化。长江源区虽然海拔高,但高原内部地势平缓,有大片宽阔平坦草场和滩地,冰冻期长,排水不畅,所以,沼泽、湖泊湿地多,沼泽面积约 1.43 万 km²,占长江源区面积的 13.9%,其中大多数分布在东南部当曲流域。

(4) 湖泊水:长江源现有湖泊总面积 1 080 km²,大小湖泊 1.1 万余个,其中 0.5 km² 以上的有 140 多个。湖泊多数为外流水系里的内流湖,多为构造断陷湖、冰蚀湖、堰塞湖等。高原湖泊特点是:外流湖一般为淡水湖;内流湖一般为咸水湖;湖水一般比平原湖泊深很多,如青海湖最深达 75 m,储水量大,仅青藏高原湖泊中淡水储量就可占到全国湖泊淡水的 46%^[1]。

2 长江源三水转换机理

2.1 降水、蒸发与径流关系

长江源区从西北到东南降水量为 244 ~ 511 mm, 径流深 50 ~ 300 mm, 由此推断陆地实际平均蒸发量在 194 ~ 211 mm, 而根据观测, 江源地区水面蒸发量在 1 278 ~ 1 631 mm, 说明江源地区十分干燥, 降水及地面液态水很容易蒸发, 降水直接产流小, 河流径流主要靠冰雪融化和地下水出流产流, 是长江流域最干燥的地区。由于大多数地区多年平均气温低于 0℃, 即使是液态地表水, 表面也常处于结冰状态, 蒸发能力减少, 所以, 水面实际蒸发量没有可蒸发量大, 冰冻的气候条件保存了更多的水在当地。当然, 冰盖和雪盖在干燥的气候和大风环境下也会发生蒸发, 向大气中不断补充水分。冰下液态水和冻土水也会向地下缓慢渗透, 而且主要发生在夏季, 不断向土壤补充地下水, 最终流向湖泊、湿地和河流, 补充地表径流。

长江源地区降水形式在冬季一般是降雪, 而在夏季, 降水形式不仅取决于气温, 还与地势和环境条件有关, 在高海拔地区或者背阳面的山地可能仍然是降雪, 而在海拔相对低的地区或者山坡迎阳面一般以降雨形式发生, 雨雪随时转换, 这就是江源三水转换关系复杂性的体现。虽然夏季时间较短, 但一般会集中全年降水量的 80%, 所以, 降雨仍然占总降水量较大的比例。

2.2 冻土及地下水

长江源区水循环最大的特点是高原地面以下有大片冻土层及季节性融解层。青藏高原大部分地区的冻土层厚度介于 100 ~ 300 m 之间, 大于 300 m 的冻土区主要分布于西藏、新疆交界处的喀喇昆仑和西昆仑山地区, 在唐古拉山、东昆仑山和祁连山地区也有零星分布, 而冻土层厚度小于 100 m 的冻土区主要分布于青藏高原周边地区。

长江源区大部分地区浅层(4 cm 深处)土壤的冻结期一般在 10 月份开始, 消融期在 4 月份开始, 冻结时间长达 6 个月左右。各层土壤间的温度梯度在秋季 9—10 月间发生一次转变, 即土壤温度梯度方向由向下转变为向上, 呈现出上冷下暖结构。在春季 3—4 月间发生另一次转变, 温度梯度方向由向上变为向下, 呈现出上暖下冷结构。当土壤温度降低到 0℃ 以下或升高到 0℃ 以上时, 土壤中的水含量和相态随之变化。土壤在垂直方向上热通量的变

化, 势必会影响到土壤和大气界面上的热量交换, 即土壤的冻融过程会引起地表热状况的变化, 进而改变陆—气间的热交换^[7]。

土壤发生冻融, 冻土层中冰、水的共存改变了土壤的水力学性质。土壤中冰的存在不仅减小了导水率, 进而影响地表水与地下水的交换, 构成地下相对不透水层, 同时改变了表层土壤的热力学性质, 含冰量高的土壤比含有相同液态水的土壤有更高的热传导率, 含冰量高的土壤热容量低, 蒸发量少, 保水效果好。由于冻结土壤中所含的冰是土壤水分的另一种存在方式, 在土壤冻结和融化时会释放或吸收大量的潜热能量, 影响热能在土壤层间的分配, 也改变了地气间的水循环, 从而对气候产生反馈作用。

高原干季向湿季转换时, 土壤湿度的变化对降水有一定的贡献, 土壤湿度的增加先于高原湿季的开始, 即高原土壤湿度增加后, 高原才进入湿季^[8]。原因是由于春季土壤温度回升并大于 0℃, 土壤中的固态水吸热开始消融, 变为液态水使得土壤含水量增多, 即土壤湿度增加, 这使得地表与大气间的水热交换增加, 这种地—气间的水热交换导致大气湿度增加, 为高原降水的发生提供了必要条件, 在适当的环流形势作用下, 高原降水发生并进入高原湿季。

浅层、季节性冻土层是大汽水和地下水重要来源, 而深层永冻土壤层是相对不透水层, 不仅保存着大量固态淡水, 而且支撑着高原、河流、湖泊和沼泽地表水水位和陆地地下水位, 阻碍了河床下切, 形成了高原特有的河道宽浅、水系散乱的河流地貌特点。如果没有永冻层, 不仅河流会下切形成峡谷河流地貌, 而且地下水位会降低, 草场会退化, 沼泽水也会大量排走, 江源水源涵养和主要生态功能将消失殆尽, 所以永冻土壤对于高原生态系统作用巨大。由于长江源水系是外流河, 几乎全部地下水在山前都流出地表进入河道, 成为江源河流径流的基流, 是地表径流的主要来源, 但地下水对于径流补给作用各河段相差较大, 趋势是高程越低, 比例越大, 如巴塘河地下水补给占径流量比例可以达到 50.6%, 布曲 26%, 而楚玛尔河为 15%, 沱沱河仅为 8%^[1]。

2.3 冰川及融解

长江源地区的冰川季节性融解是自然现象, 只要气温高于 0℃, 冰川就开始融化, 而低于 0℃ 时, 地表水和降雪就会结冰, 形成新的冰川。根据分析^[3], 冰川融水对河流径流贡献各河段不一样, 沱沱河由于地势高, 降水量少, 冰川融解对于径流的贡献可以达到 22% 以上(也有人^[1]认为达 80%), 而对于布曲约 18%, 当曲约 20%, 到通天河下游仅为

9%左右,估计长江源区冰川融水补给占径流量比例在19%^[1]。

在江源地区,固体水与液体相互转化频繁。冰川融水称为高山冰雪融水,冰川在融化过程中还伴有永久积雪和新雪,所以,在融水径流中很难分清哪些是冰川融化的,哪些是雪盖融化而来,但也不能笼统地称为冰雪融水,因为冰融水还包括了河冰,而雪的融化包括季节性积雪的融化。

长江源冰川出现高程和面积大小主要受气候变化影响。自第四纪以来,长江源地区的冰川进退曾经发生过多次周期性的变化,在冰盛期,冰川面积比现在大10倍以上,而全新世中期温暖时期,冰川面积比现在少很多。根据近几十年来的监测,长江源气温出现明显上升趋势,冰川面积总体处于退缩趋势^[4],但冰川加速融解对于径流贡献不明显,主要原因是冰川加速融解主要指多年平均累积情况,时间尺度比径流产生速度慢很多,而且江源地区水面蒸发能力强,大多数融冰水会通过蒸发回到大气中或者下渗,所以,冰川加速融化并不能显著增加河流的径流量。

2.4 湖泊及沼泽水

湖泊沼泽水主要来源于冰川融水、河流补水和地下水渗出。由于降水直接产流小,夏季冰川融水是湖泊、沼泽水的主要来源。青藏高原湖泊具有以下特点:①由构造出现的湖泊一般水较深,储水量大,湖水热容量大,湖水温度相当稳定,在漫长的冬季是高原的主要热源,对于湖滨地区气候具有明显的调节作用;②外流湖泊一般是淡水湖,而且冬季冻结深度大于咸水湖泊;③长江源区由于冬季冰封时间长,湖泊水位季节性变化幅度小。

长江源地区由于四周基本被高山围绕,高原地势平缓,一望无际,降水和冰雪融化排水不畅,再加上深层有永冻土作为不透水层,在低洼处形成大片沼泽湿地,由于人车很难进入,保留了大片未受干扰的高原湿地生态系统。

3 气候变化对于水循环机制影响

气候变化是目前世界热门话题,而长江源区由于处在高海拔地区,冰雪及冻土是主要环境因素,而且人类活动少,对气候变化最为敏感。

气候变化对长江源区影响包括:不同时间尺度的气温变化及植被覆盖变化;降水、蒸发和径流关系变化;汽固液三水转换关系变化等多方面。长江源

存在大量冰川、雪盖和冻土等固态水,是江源地区气候和环境的“稳定器”。由于气候变化本来就存在不同时间尺度的周期性,生态系统也会逐步适应这种变化,但如果由于人类活动影响,气候变化在较短时间内偏离自然演变周期,就会使生态系统退化和损害。显然,如果气候在较短时间内(如几十年到上百年)持续变暖,会导致冰川面积减少,冻土活动层增加,大汽水、降水、液态水增多,短期内径流可能会增加,但长时间后,由于固态水减少,江源水源涵养能力降低,对于生态系统影响将是深远的。虽然气候变暖会使高原植物覆盖率增加,但会刺激高原鼠兔和牛羊存栏量的增加,很快就抵消了植被增加带来的好处。再如,冻土融化层增加,不仅增加沼泽泥炭中温室气体释放,而会严重影响公路、铁路等国家重要基础设施的维护成本,所以,长江源地区受气候变化特别敏感,其水循环机理的变化会对高原生态环境产生重大影响。

近40年(1957—1997年)来,长江源区气温的升高幅度在 $0.07 \sim 0.23^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,累积升温在 $0.3 \sim 0.7^{\circ}\text{C}$,高于全国平均升温幅度($0.4 \sim 0.5^{\circ}\text{C}$),也高于青藏高原平均升幅(0.6°C)^[4],近10年(2000—2009年)来,比多年平均(1959—2009年)气温增加 0.9°C ,处于50年来最高时期。包括长江源在内的青藏高原地区目前都处在持续缓慢升温期,特别是自2005年以来,江源三水转换关系已经产生显著变化及影响,主要变化是:一是夏季雨水量明显增多;二是冬季降雪量减少,冰川及高山雪盖减少;三是高原湖泊和沼泽水面在持续20多年下降后开始增加,一改过去萎缩的趋势。这些变化的生态环境影响是高原植被指数有所提高,但鼠兔和畜牧量也同步增加,其生态环境长期影响有待进一步的观察和研究。

4 结 语

长江源区气候及水文特性与同纬度的长江中游地区受海洋季风气候影响的有明显不同,该地区三水的内部水循环比外部循环作用更显著,同时受气候变化影响更加敏感。特殊的高原大陆型气候环境,使江源区成为我国生态环境极度敏感和脆弱的地区,甚至可以作为我国受气候变化影响的“晴雨表”。长江源地区气候和水文过程存在周期性变化的特征,人类活动如何影响及影响程度如何等问题值得进一步的观察和研究。关于长江源区三水时空分布规律及转换关系还有大量基础性的科学问题值得去研究:如江源大气水分来源的方式和途径;冰川

雪盖及湖泊受气候变化响应;冻土在水循环过程中的作用;水循环机理变化对于生态环境及人类活动影响等。三江源保护措施应该遵循自然演变规律,采取适应性的综合措施才会有成效。

参考文献:

[1] 靳亚立,秦宁生,毛晓亮. 近 45 年来长江上游通天河径流量演变特征及其气候概率预报[J]. 气候与环境研究,2005,10(2):220-229. (JIN Li-ya, QIN Ning-Sheng, MAO Xiao-liang. Features of Runoff in the Upper Reaches of the Tongtian River and Its Climatic Probability Forecast in Recent 45 Years[J]. Climatic and Environmental Research, 2005,10(2):220-229. (in Chinese))

[2] 徐 明,马超德. 长江流域气候变化脆弱性与适应性研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009. (XU Ming, MA Chao-de. Vulnerability and Adaptation of Climate Change in Yangtze River Basin[M]. Beijing: China Water Power Press, 2009. (in Chinese))

[3] 朱延龙,陈 进,陈广才. 长江源近 32 年径流变化及影响因素分析[J]. 长江科学院院报,2011,28(6):1-4. (ZHU Yan-long, CHEN Jin, CHEN Guang-cai. Runoff Variation and Its Impacting Factors in the Headwaters of the Yangtze River in Recent 32 Years[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2011,28(6):1-4. (in Chinese))

[4] 尚大成. 青藏高原冻融过程与东亚夏季风关系的研究

[D]. 兰州:兰州大学,2006. (SHANG Da-cheng. Relation Between Frozen-Thaw Process of Qinghai-Tibet Plateau and East Asia Monsoon[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006. (in Chinese))

[5] 长江水利委员会. 长江源综合考察与研究[M]. 武汉:长江出版社,2011. (Changjiang Water Resource Commission of MWR. Integrated Investigation and Research on the Source Region of Yangtze River[M]. Wuhan: Yangtze River Press, 2011. (in Chinese))

[6] 世界自然基金会. 长江源区气候变化及其生态水文影响[M]. 北京:气候出版社,2008. (World Wildlife Fund. Climatic Change in the Source Region of Yangtze River and Its Impact on Eco-hydrology[M]. Beijing: Climatic Press, 2008. (in Chinese))

[7] 汤奇成,何希吾,赵楚年. 青藏高原的水资源[M]. 北京:中国藏学出版社,2003. (TANG Qi-cheng, HE Xi-wu, ZHAO Chu-nian. Water Resource in the Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: China Tibetology Press. (in Chinese))

[8] 祝有海,卢振权,谢锡林. 青藏高原天然气水合物潜在分布区预测[J]. 地质通报,2011,3(12):1918-1927. (ZHU You-hai, LU Zhen-quan, XIE Xi-lin. Potential Distribution of Gas Hydrate in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Geological Bulletin of China, 2011,3(12):1918-1927. (in Chinese))

(编辑:赵卫兵)

Water Cycle Mechanism in the Source Region of Yangtze River

CHEN Jin

(Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Because of special geography and climate environment, the water circulation mechanism in the source of Yangtze River has a distinct characteristic. According to the features of climate, precipitation, glaciers and permafrost in the source region of Yangtze River, the mechanism of transformation among water vapor, solid water and liquid water are analyzed. Results show that despite the lack of rainfall in the source region of Yangtze River, there are huge amounts of solid water storage. Its unique characteristics of water cycle mechanism have constructed a fragile ecological system in the Yangtze River source region. Once the water cycle mechanism changes, the ecological environment will be significantly affected.

Key words: the source region of Yangtze River; rainfall; water cycle; eco-system

=====

长江科学院获批中国清洁发展机制基金赠款项目

根据“国家发展改革委关于下达中国清洁发展机制基金 2012 年度第一批赠款项目计划的通知”(发改气候[2013]109 号),长江科学院水环境所申报的“全球气候变化下长江流域水资源开发利用保护研究与宣传培训”获批列入中国清洁发展机制基金 2012 年度第 1 批赠款项目。该项目是 2012 年度水利部唯一获批的中国清洁发展机制基金项目。

长江科学院水环境研究所将按照“中国清洁发展机制基金赠款项目管理办法”和项目任务书的要求,开展项目的启动工作。同时,长江科学院水环境研究所将以该项目为切入点,积极开展气候变化对长江流域的影响和长江流域应对气候变化的适应性研究,推进长江流域应对气候变化工作。

(摘自:长江水利科技网)