

我国东部季风区不同自然带年径流特征及人类活动影响的比较研究*

许炯心

(中国科学院 地理研究所 北京 100101)
国家计划委员会

摘 要 本文在分析我国东部季风区不同自然带年径流与气候因子关系的基础上,揭示了径流深随纬度和经度变化的规律,并对不同自然带中人类活动对河川径流的干预强度进行了比较,指出半干旱区是人类活动对径流影响最严重的地区,在这里应加强水资源的保护并大力推行各种节水措施。

关键词 径流地带性 人类活动对径流影响 比较研究 中国

分 类 (中图法) P343 (科图法) 57.141

1 问题的提出

某一地区的河川径流取决于该地区的降水与蒸发的对比关系,后两者都受到气候条件的制约。因此,从宏观尺度上看,径流特征是气候的产物。从这种意义上说,地表水资源是具有鲜明的地带性特征的。从本质上看,人类活动是一种非地带性因素,但由于不同自然带中可获得的水资源量是不同的,因而不同自然带的水资源供需关系也表现出不同的水平。因此,对于不同自然带的河川径流和人类活动对径流的影响进行比较研究,不仅有助于阐明我国水资源特征的地带性分异规律,而且可以在这一基础上,为我国水资源可持续利用的宏观规划与决策提供必要的参考与依据。

2 影响年径流的气候因子

在影响年径流形成的气候因子中,降水量和气温是最重要的。由这两者所决定的气候湿润或干燥程度,对径流的形成和地域分布也起着重要的作用。我们收集了我国东部季风影响

* 国家自然科学基金资助项目(4860025)

收稿日期:1994-06-28,收到修改稿日期:1995-04-18

区内近 70 个面积在 30 000km² 以下的代表性流域的资料，对此进行了分析。

2.1 年降水量与径流深

图 1a 中点绘了我国不同自然带河流的年均径流深 H_r 与年均降水量 P 的关系。可以看出，二者呈密切的正相关。仔细观察可以发现，大约以 800mm 年降水量为界，大于此值的南方河流和小于此值的北方河流，其点据各自成为一条直线，表明了径流—降雨关系的地带性差异。这两条直线可以分别用下列二式来表示：

对于南方河流：
$$H_r = 0.025\ 60\ P^{1.415}$$

对于北方河流：
$$H_r = 0.000\ 000\ 034\ 66\ P^{3.423}$$

前者的斜率大大小于后者，这意味着随着年降水量的增加，北方河流的径流深增加的速率要比南方的河流大一些，这反映了南方河流和北方河流不同自然地理背景对产流的影响。

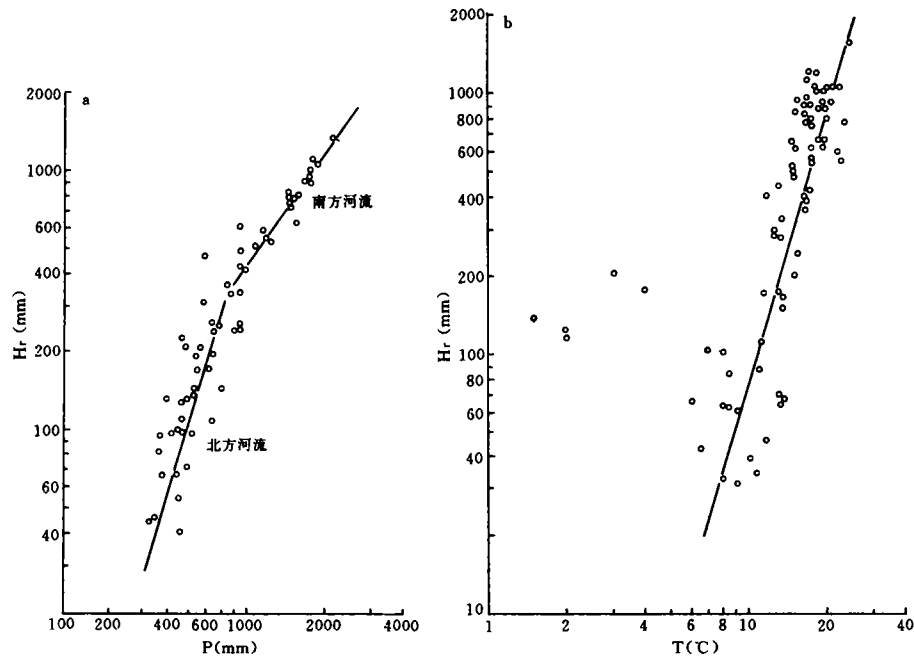


图 1 我国不同自然带代表性河流的径流
深 H_r 与年降水量 P 及年均温 T 的关系
a. H_r-P ; b. H_r-T

Fig.1 The relation between mean annual runoff H_r ,
precipitation P (a) and temperature T (b)

2.2 气温与年径流深

图 1b 中点绘了我国不同自然带河流的年均径流深与年均温的关系。可以看出, 当年均温在 6℃ 以上时, 径流深 H_r 与年均温 T 之间呈现出明显的正相关关系, 且可以用下式拟合:

$$H_r = 0.026\ 22\ T^{3.447}$$

从机理上看, 在年降水量相同时, 气温越高则蒸发越强, 因而径流深应该越小。我们认为, 之所以会出现图 1b 中所示的情况, 主要是由于我国特定的自然地理结构, 使得降水量与气温呈现出很强的正相关。年降水量与年均温的点绘结果表明, 在年均温小于 7℃ 时, 年降水量基本上不随气温而变化, 当年均温高于 7℃ 时, 随着年均温的增加, 年降水量急剧增加。

通过以上分析可以认为, 在宏观尺度上, 影响我国河川径流特征的主要是降水因子, 气温对径流的影响在很大程度上是由气温与降水量的相关关系来决定的。

2.3 流域干燥程度与年径流深

为了刻画流域干燥程度, 我们引进流域干燥指标 I_d :

$$I_d = \frac{E_a}{P}$$

式中 E_a 为流域多年平均实际蒸发量, P 为流域多年平均降水量。如果考虑闭合流域的多年平均状况, 则流域蓄变量可以近似地视为零。根据水量平衡关系, E_a 即为多年平均径流深与多年平均降水量的差值, 因而 I_d 可以依据降水与径流资料计算而得到。

研究表明, 我国不同自然带河流的 H_r 与 I_d 之间呈现出十分密切的半对数关系, 可以用下式来表达:

$$H_r = 4\ 744.78\ e^{-4.784\ 4I_d}$$

即流域干燥程度越高, 则径流深越小。

3 我国年径流的地带性分异

由于降水、气温和干燥程度均为地带性因子, 我国的河川径流特征也表现出十分鲜明的地带性。

3.1 不同自然带河流的流量—流域面积关系

图 2 中点绘了年均流量 Q 与流域面积 A 的关系, 图中以不同的符号代表不同自然带的河流。可以看到, 代表不同自然带河流的点据各自成为一条直线, 各条直线互相平行, 即

对于湿润区的河流:

$$Q = 0.120\ 8\ A^{0.849}$$

对于半湿润区的河流:

$$Q = 0.040\ 17\ A^{0.849}$$

对于半干旱区的河流:

$$Q = 0.014\ 17\ A^{0.849}$$

因为上述三条直线是平行的, 故在流域面积 A 相同时, 流量 Q 之比即为各式右端系数之比。由此可以求出, 就平均情形而言, 在流域面积相同时, 湿润区、半湿润区、半干旱区河流年均流量之比为 8.53 : 2.83 : 1。

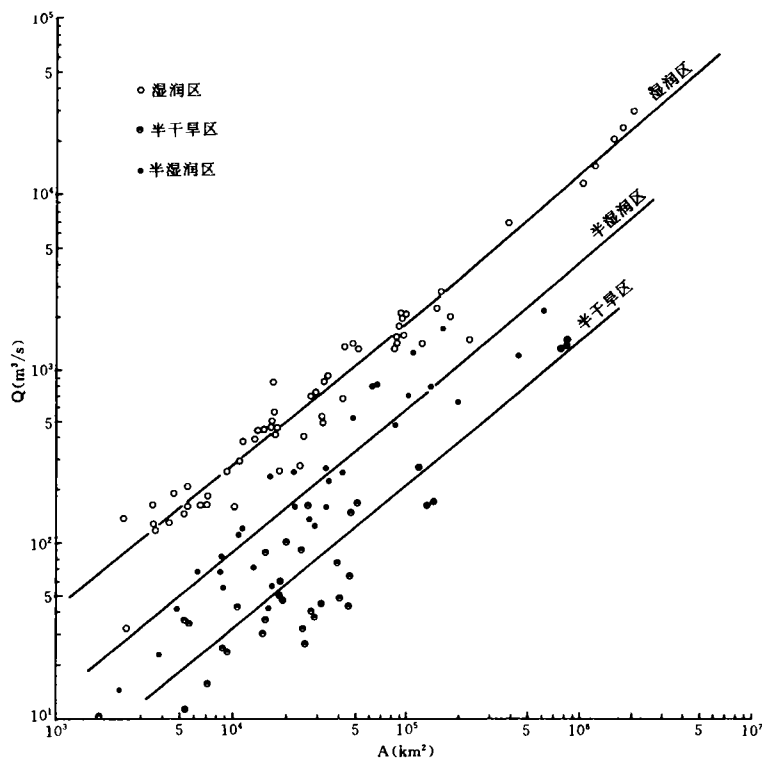


图 2 我国不同自然带河流的年均流量 Q 与流域面积 A 的关系
Fig. 2 The relation between mean annual discharge Q and drainage area A ,
based on rivers from humid, sub-humid and semiarid zones in China

3.2 我国东部季风影响区年径流的纬度变化

为了进一步对我国不同自然带河流的径流特征进行比较,我们以我国不同自然带(不包括西北内陆区)的 700 余个面积在 100—10 000 km² 之间的中等流域的资料为基础,点绘了年均径流深随纬度的变化(图 3a)。为了避免点据的过分散,我们采用了按纬度范围分级并求出各纬度分级中各流域的径流深平均值的方法。图 3a 中的曲线系由各纬度分级范围中的径流深平均值对于该纬度级别的中值点绘而成。可以看出,我国东部季风影响区内河川径流的纬度变化具有十分明显的规律。华南地区,径流深最大,向北去逐渐减小。在北纬 31°—36°之间,径流深迅速减小。具有很大的经向变化梯度。在北纬 36°—40°之间,径流深达到最小值。再往北去,进入东北松花江流域以后,径流深又略有增加。处于我国东部季风影响区内径流深最低值区间的地区,主要为黄土高原和黄淮海平原北半部。这表明,这些地区是我国东部季风影响区水资源最为紧缺的地区。

我们还点绘了我国东部季风影响区中近 70 个有代表性的中等流域的年均降水量随纬度

的变化图，结果表现出与图 3a 完全相同的趋势，说明我国东部季风影响区径流深的变化，主要是由降水量的变化所决定的。

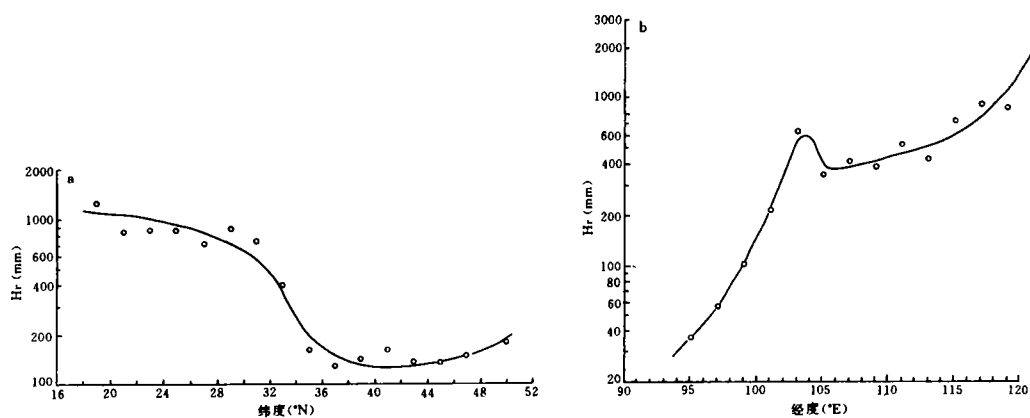


图 3 我国年径流的地带性变化
a. 径流深 H_r 随纬度 φ 的变化
b. 径流深 H_r 随经度 θ 的变化

Fig. 3 Mean annual runoff H_r varying with latitude φ (a) and longitude θ (b)

3.3 在东亚季风影响下年径流的经度变化

东亚季风是我国气候最重要的影响因子，它直接控制着我国降水特征的空间分布格局和季节分配特征^[1]。我国径流深随经度的变化，在很大程度上是受东亚季风影响的结果。

由于我国大陆特定的海陆分布位置，来自太平洋的季风呈东南向，与经线的展布方向成一定的交角，因此，运用全国范围内的资料来点绘径流深随经度变化，不一定能准确地反映东亚季风的影响。因此，我们按照与夏季风平行的方向，选取了由台湾、浙江、福建、安徽、江西、湖南、湖北、四川、陕西、甘肃、青海等省所组成的条带状地区，以区内近 400 个流域面积在 100—10 000km² 之间的中等流域的资料为基础，点绘了径流深与经度的关系（图 3b）。该图同样是按照经度分级、求取各经度范围内径流深的平均值点绘而成的。

从宏观上说，除了东亚季风之外，我国由三级巨大阶梯构成的大地貌格局，也对径流的经度变化起着重要的控制作用。图 3b 的曲线反映了二者综合作用的结果。从图中可以看到，从东经 110°开始，随着经度的减小，径流深也减小，这反映了夏季风携带的巨量水气沿程衰减的过程。但从曲线上可以看出几个明显的转折点，反映出夏季风通过大地貌阶梯分界处时，地形抬升作用对降雨的影响。从东经 120°到 115°，径流深减小较快，115°以后减小速率明显变慢，这是由于进入第二级阶梯以后的地形抬升作用所致。至 103°，恰处于青藏高原东南缘，即川西高原与四川盆地的过渡带，地形剧烈抬升，导致夏季风中携带的水汽大量凝结，使这里

成为我国著名的暴雨中心,径流深迅速增大,出现局部的峰值。翻越这一台阶而到达高原面即第一级阶梯面之后,夏季风中携带的水汽已释放殆尽,降水量迅速减小,因而径流深急剧下降。

4 我国径流深宏观分布中的空间突变现象

在图 3 中的两条曲线上,都可以看到空间突变现象。从图 3a 所示的我国东部季风区径流深随纬度的变化曲线上,可以发现,在北纬 31° — 34° 之间,径流深急剧减小,形成一个空间变化梯度的高值带。这一高值带以北与以南, H_r 的空间变化梯度(以曲线的斜率来表征)均较小,因而这一高梯度带可以视为空间突变带。从自然地理上说,此带恰为我国最重要的自然地理分界线秦岭淮河线,在越过此线时,径流深发生了急剧变化。这一突变带既是一个生态过渡带(或称为生态交错带,即 Ecotone),又是水文响应的敏感带,因而在进行全球变化导致的区域水文响应的监测时,应在这里加以重点研究。

在图 3b 中可以看到另一个突变带,它们在东经 103° — 105° 之间,一方面在曲线上出现了一个引人注目的拐点;另一方面,此带以东,径流深的空间变化梯度较小,而以西则急剧增大,表现了曲线的显著不连续性。如前所述,此带恰位于我国第一级与第二级宏观地貌阶梯之间的接触带,而此带又是东部季风区与青藏高原区两大自然地理单元之间的分界线。同样地,这是又一个生态过渡带与水文响应敏感带,应该在全球变化研究中加以重点监视。

5 我国不同自然带人类活动对径流的影响

上文中揭示的我国河川径流随纬度和经度的变化,表明我国水资源的空间分布是很不平衡的。由于这种不平衡,不同自然带内人类活动对河川径流的干预存在着强度上的差异。湿润和半湿润地区,河川径流丰沛,同时天然降雨亦能满足农业生产上的大部分用水需求,故人类活动对天然径流过程的干预强度不大。半干旱地区,由于水资源相对短缺,且天然降水不能满足农业生产上的需水要求,故人类转而大量利用河川径流。这样,人类活动对天然径流过程的干预强度是很大的。干旱地区,水资源更少,但因为人口密度较小,开发利用程度低,故人类活动对天然径流的干预强度反而不如半干旱地区大。

为了描述人类活动干预天然径流过程的强度,我们引进下列指标:

$$I_m = \frac{Q_n - Q_m}{Q_n}$$

式中 I_m 为人类活动影响径流的强度指标, Q_n 为经还原计算后的天然径流量。 I_m 值越大,说明人类活动对径流的干扰强度亦越大。

为了在我国现状用水条件下,对不同自然带人类活动对河川径流的影响进行比较研究,以我国湿润、半湿润、半干旱地区的 30 余个流域有水文记录以来的资料为基础,我们在图 4 中分别点绘了 I_m 与流域干燥指标 I_d 及年均降水量 P 的关系。由于资料的限制,未能包括干旱地区河流的点据。从图中可以看到, I_m 和 I_d 之间,存在着比较密切的正相关关系,可以分别用

下列二式来表达：

$$I_m = 1.816 \times 10^6 P^{-2.529}$$
$$I_m = 0.5398 I_d^{2.10}$$

这证明了上文中所作的推理，即半干旱地区人类活动对河川径流的干预强度很大，而湿润地区则相对较小。

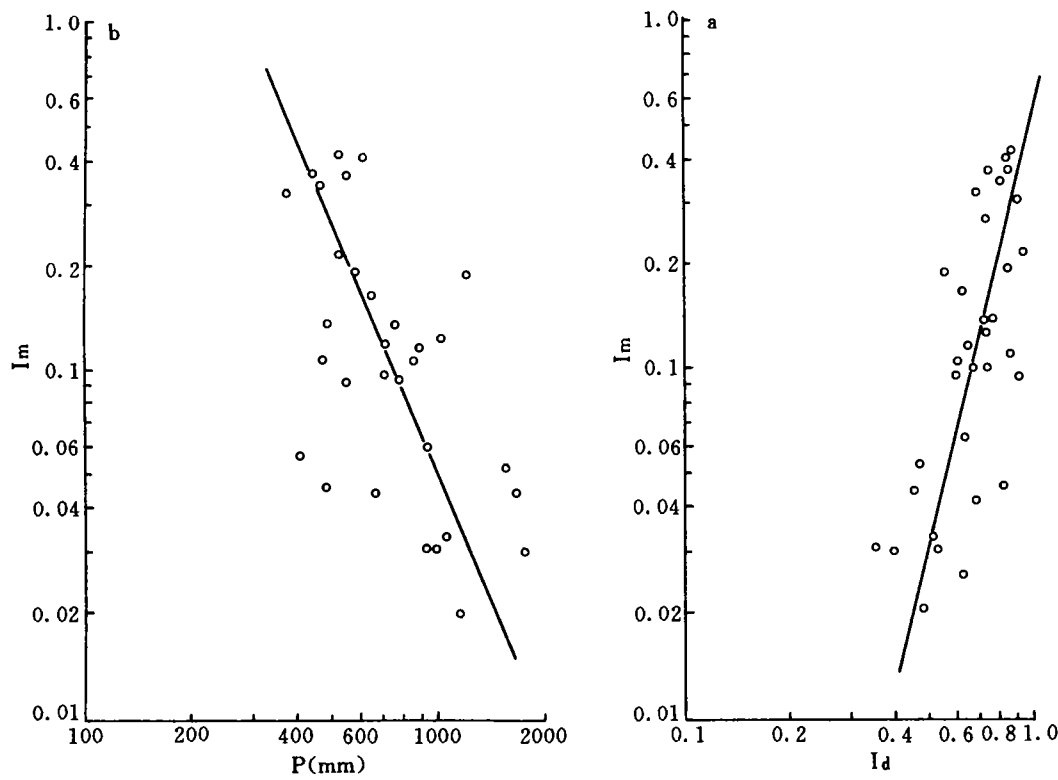


图4 我国不同自然带河流中人类对径流的影响强度
指标 I_m 与流域干燥指标 I_d 及年降水量 P 的关系
a. I_m-I_d b. I_m-P

Fig. 4 Relation between the human influence intensity index I_m ,
the river basin dryness index I_d (a) and mean annual precipitation p (b)

值得注意的是，上列二式的方次都很高，这说明随着流域干燥程度的增加或降水量的减少， I_m 值以极快的速度增加。为了直观地说明问题，可以指出，按照上列二式计算的结果表明，如果干燥程度增加 10%，则 I_m 值将增加 49.3%；如果年降水量减少 20%，则 I_m 值将增加 75.8%。

为了更进一步揭示人类活动对河川径流干扰强度的地域变化，我们将我国东部季风影响区不同自然带的 30 余个流域的 I_m 值与其流域重心的纬度 φ 点绘作图（图 5）。该图表明，在我国东部，人类活动对径流干扰强度最大的流域，位于北纬 35° — 40° 之间，这与图 3a 中揭示的径流深低值区是吻合的。仔细的观察表明，这一 I_m 高值区中的河流，几乎全部位于黄淮海平原北半部，这是目前我国人类活动对径流影响最大的地区。

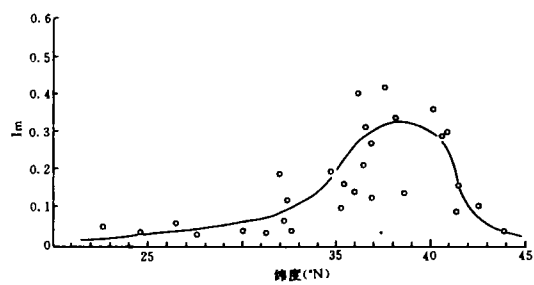


图 5 I_m 值随流域重心纬度 φ 的变化

Fig. 5 The human influence intensity index I_m varying with latitude φ

6 人类活动对径流干扰强度高值区中水资源保护的紧迫性

从上节可以看到，半干旱区是人类活动对径流干扰强度最大的地区。黄淮海平原北半部虽属于半湿润区的，但平原自身产流甚少，其主要河流如黄河、海河的上、中游大多位于半干旱区。

半干旱区生态系统的结构比较脆弱，它对环境变化的反映十分灵敏，而且一经破坏，则很难在短时间内恢复。在半干旱地区，水是区域发展的关键因素。而人类活动对天然径流的干预强度，很容易超过自然本身的承受能力。一旦超过，则有严重的环境负效应。例如在海河平原对水资源的超量利用，使得海河水系的平原河流大部分断流，由此造成严重的后果。对此，我们已在文献〔2〕中进行了详细讨论。河道在全年中大多数时间内断流，使河流在很大程度上成为排污水道，河流水生生态环境遭到毁灭性的破坏。由于河川径流不能满足工农业用水的要求，人们转而大量开采地下水，加之河道对地下水的侧渗补给大大减少，因而地下水位急剧下降，河道两侧出现沙化趋势，沿海局部地区海水从地下含水层中入侵，使地下水矿化度增大，水质恶化。

河川径流是河川形成最重要的动力因素。不同自然带人类活动干预河川径流在强度上的差异，会反映到河床演变动态的变化中去，甚至使河床演变的趋向发生根本的变化。湿润、半湿润地区，径流相对减少量不大，故河床演变仍能服从天然河流的规律。半干旱地区，河道中的水量大幅度减少以至于断流，这就使得河床演变不再服从原有的规律。如黄淮海平原北

半部的一些河流，经常性水流不再是造床的主要动力，风力作用和间歇性水流的作用取而代之，成为河床变化的主要动力因素。

在人类活动影响下，半干旱地区的河川径流大幅度减少（如我国北纬 35° — 40° 之间，减少幅度可达 20—40%），将会导致河流挟沙能力的变化。因为引水多发生在枯季，故枯季流量减小的幅度，远比全年为大。如所周知，河流输沙率与流量的高次方成正比，指数一般为 $2-3^{[3]}$ ，故流量减小后，水流挟沙能力的减小幅度远比流量自身的减小幅度为大。这样势必加剧多沙河流中枯水时的淤积。以黄河下游山东段为例，其河床淤积主要发生在枯水期，中枯水时淤积下去的粗泥沙是河床强烈抬高的主要原因^[3]。故人类活动对径流干扰的结果，将会使河势更为恶化。目前黄河流域工农业引水量已占到多年平均径流量的 46.3%，其后果是不容低估的。

从以上分析可知，半干旱地区的水资源保护，比之湿润和半湿润地区甚至干旱地区更为迫切，必须引起有关决策部门的足够重视。跨流域引水，不失为解决这一问题的最好方案。在未能实现之前，在半干旱地区大力发展节水型农业，应该是解决问题的主要对策。

7 结 论

1. 在气候因子中，降水是我国河川径流形成的主导因子，降水的地带性导致了河川径流的地带性。

2. 在我国东部季风影响区中，从南向北，年径流深逐渐减小，北纬 31° — 36° 是径流深经向梯度最大的地带， 36° — 40° 是径流深达到最低值的地区。再往北去，进入东北，径流深有所回升。

3. 我国年径流深的经度变化是东亚季风与由三级阶梯构成的我国大地貌格局综合作用的结果。从东向西，随经度的减小，径流深也减小。但通过第一级阶梯与第二级阶梯的接触带时，由于强烈的地形抬升作用，使得降雨量增加，因而径流深也增加。此后则急剧减小。

4. 在半干旱、半湿润和湿润区的范围内，我国人类活动对径流的影响强度指标 I_m 随气候干燥程度的增加而显著增加。在半干旱区， I_m 达到最大值。黄淮海平原北半部是我国人类活动对径流干预强度最大的典型地区，已造成了严重的环境负效应，亟待采用节水农业技术等有效措施加以解决。

参 考 文 献

- 1 任美鏊．中国自然地理纲要．商务印书馆，1982：47—56.
- 2 许炯心．水库对黄淮海平原环境的影响．黄淮海平原农业自然条件和区域环境研究．第二集．科学出版社，1987：225—237.
- 3 钱宁，周文浩．黄河下游河床演变．科学出版社，1965.
- 4 尹学良．黄河下游冲淤特性及其改造问题．泥沙研究，复刊号，1980：75—82.

A COMPARATIVE STUDY ON THE ZONAL DIFFERENCES IN RIVER RUNOFF AND HUMAN INFLUENCE IN CHINA

Xu Jiongxin

(*Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101*)

Abstract

This paper deals with the zonal differences in river runoff and human influence in China, based on the data from 700 river basins. Some regression equations have been established between mean annual runoff and climatic variables such as mean annual precipitation, temperature and aridity index, indicating that precipitation is the major controlling factor of runoff formation from a macroscopic point of view. Therefore, the zonality of runoff is resulted from the zonality of precipitation. Based on data from 700 and 400 river basins respectively, two curves showing the latitudinal and longitudinal variations in runoff have been established in this study. In the monsoon-influenced eastern China, mean annual runoff decreases from south to north, and reaches the minimum in the zone $36^{\circ}-40^{\circ}\text{N}$; going further into Northeast China, it increases slightly. The longitudinal variation in runoff is controlled by the joint operation of the east Asian monsoon and the three-stepped macro relief of China. From south-east to northwest, mean annual runoff declines. However, when crossing the bordering zone between the first and the second great steps of macro relief, runoff increases sharply due to the rapidly increased precipitation induced by topographical uplift, and then the runoff declines again. Two sensitive zones are identified from the above two curves, where monitoring stations should be established for the study of regional hydrological response to the global climatic change. Based on 30 representative rivers from different natural zones, the human impact on runoff has been analyzed, showing that the intensity index of human influence I_m increases with an increased river basin aridity index; here I_m is defined as the difference between the natural and actually measured runoffs divided by the natural runoff. In semi-arid zones, mainly the North China, the human impact on river runoff is the strongest, and the water-saving agricultural measures are urgently needed.

Key words Zonality of river runoff, Human influence on runoff, Comparative study, China