

基于点入渗参数计算土质渠床自由渗漏损失的方法

李红星, 樊贵盛

(太原理工大学环境科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 基于非饱和土质渠床有压单点入渗试验, 对自由渗漏情况下土壤有压入渗率随时间的变化过程进行了系统性的分析, 建立了渠床土壤有压点入渗经验模型, 研究了土壤入渗模型参数与水深之间的函数关系。基于点入渗参数与水深之间的函数关系, 提出了沿断面积分计算渠道输水渗漏量的模型。该计算模型通过入渗模型参数全面反映了渠道土质、干容重、含水量和水深对渗漏量的影响。计算实例表明: 与考斯加科夫公式计算结果相比较, 该计算结果可更真实地反映渠道渗漏量随时间的变化过程, 并具有更高的精度, 证明利用点入渗参数计算渠道输水渗漏量是可行的。

关键词: 非饱和土壤; 入渗参数; 渠道渗漏损失; 有压入渗; 计算模型

中图分类号: S152; TV93 文献标志码: A 文章编号: 1001-6791(2010)03-0321-06

渠道渗漏损失是指渠道输、配水过程中, 通过土质渠床表面渗入渠床土体而损失的水量。国内外学者对非稳定和稳定入渗阶段的渠道渗漏损失计算进行了大量研究, 提出了具有不同特点和用途的经验公式, 有 Davison-Wilson 公式、考斯加科夫公式、Ingham 公式、Molesworth 公式、魏吉尔尼柯夫-巴甫洛夫斯基公式、考斯基公式和美国垦务局对各种土质渠床提出的输水损失经验公式等^[1-2]。目前, 计算渠道输水渗漏损失时广泛采用的是考斯加科夫公式, 该式具有形式简单、应用方便的特点。门宝辉、谢崇宝、白美健等对考斯加科夫公式进行了进一步研究, 并提出了公式中流量取值的方法^[3-5]。但由于该公式是基于渠道流量而得到的经验公式, 公式中没有考虑水深的影响, 实践表明, 应用该公式对最优断面渠道设计流量情况下的渗漏量进行计算可得到较高的精度。而事实上, 渠道断面不一定是最优断面, 输水流量也往往不是设计流量, 此时用该式进行计算, 就难以得到满意的结果; 另外, 式中只考虑了土质对渗漏量的影响, 而研究表明, 在相同土质条件下, 渠床土壤的含水量和土壤干容重都对土壤入渗产生影响^[6-9], 特别是对于渠道输水初期或输水时间较短的渠道来说, 其入渗属于非饱和土壤的入渗, 实测渗漏量与该式计算结果有较大的差别。本文通过系统的有压入渗试验, 确定了土壤有压入渗参数, 通过对典型渠道渗漏过程的分析, 利用积分的方法得到基于点入渗参数计算土渠床渗漏损失的计算模型。

1 试验材料和方法

试验土样采自山西省汾河灌区, 选取清徐东于井灌渠道、清徐灌溉试验站、云中支、东南坊、山西省灌溉试验站和试验站南河水灌溉渠道的 6 种土壤为试验土壤。供试土壤砂粒变化范围为 36% ~ 82%, 粉粒含量变化范围为 7% ~ 46%, 粘粒含量变化范围为 11% ~ 18%。

土壤有压入渗试验采用自制的有压入渗仪进行, 有压入渗仪主要由马氏筒和渗吸管两大部分组成。试验土柱的设计干容重控制在 $1.40 \sim 1.60 \text{ g/cm}^3$ 之间, 入渗水头 h 控制在 $0 \sim 180 \text{ cm}$ 之间, 土壤初始含水量 θ_0

收稿日期: 2009-05-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40671081)

作者简介: 李红星 (1974-), 男, 山西太谷人, 博士研究生, 主要从事水土环境控制研究。

E-mail: lhhongxing01@sohu.com

取 9.0% ~ 25.4%。土柱按设计的干容重分层填筑, 每层厚度为 2 cm。为更好地模拟田间渠床土体条件, 土样不碾碎, 不过筛。试验过程中, 分时段记录入渗水量和湿润峰推进距离, 试验结束时间由稳定入渗条件控制, 即整个土柱完全渗透时结束试验。

2 渠床土壤有压点入渗过程与模型

2.1 渠床土壤有压点入渗过程

图 1 为山西省灌溉试验站土样入渗率随时间的变化曲线, 其中, 粘粒含量为 18.25%、干容重为 1.50 g/cm³、含水量为 18.3%、入渗水头为 60 cm, 由图 1 可以看出, 在自由渗漏情况下土壤有压点入渗过程可分为 3 个阶段: 入渗率 (i) 快速下降阶段 (第 I 阶段)、 i 线性递减阶段 (第 II 阶段) 和稳定入渗阶段 (第 III 阶段)。

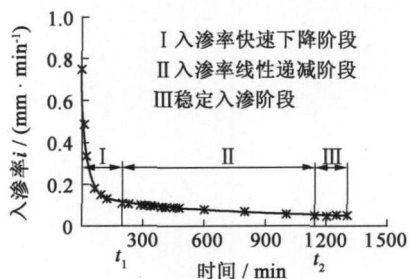


图 1 入渗率随时间的变化曲线

Fig 1 Variation curves of infiltration rate i with time

第 I 阶段, 土壤入渗能力强, i 非常大, 0~200 min 平均 i 达到 3.45 mm/m in, 200 min 时累积入渗量达到 47.07 mm; 随着时间的延续, 土壤入渗能力逐渐降低, i 快速衰减, i 从 6.78 mm/m in 降至 0.11 mm/m in; 经历 200 min 后 i 变化趋缓, 进入第 II 阶段, 该阶段 i 线性递减; 入渗经历 1142 min 后, 水流穿透被试土柱, i 保持定值不再发生变化, i 为 0.051 mm/m in, 入渗进入第 III 阶段。第 I、II 阶段对应于渠道渗漏的湿润土层阶段, 为非稳定渗漏, 当地下水位较深时这一阶段要持续很长时间, 对于输水时间较短的渠道而言, 则可能是其入渗的全部过程, 第

II 阶段对应渠道稳定自由渗漏阶段, 这种情况发生在地下水面距离渠底较远时, 地下水面与渠底无直接的水力联系, 此时渠道渗流量并不随地下水位的上升而变化。

2.2 渠床土壤有压点入渗模型

对渠道自由渗漏的大量试验数据分析表明: 有压入渗条件下, 入渗经历 200 min 左右进入 i 线性递减阶段。分析有压入渗过程各阶段 i 的变化特性发现: 第 I 阶段 i 的变化过程与考斯加科夫两参数入渗模型的吻合较好; 而在第 II 阶段, i 随时间的增加而减小, 其变化遵循线性变化规律; 第 III 阶段 i 为一常量。则有压入渗 i 的经验模型可表达为

$$i(t) = \begin{cases} k_0 t^{-\alpha_0} & t \leq t_1 \\ i(t_1) + b(t - t_1) & t_1 < t \leq t_2 \\ f_0 & t > t_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 k_0 为入渗系数; α_0 为入渗指数; f_0 为稳定入渗阶段的 i ; b 为第 II 阶段 i 变化的斜率; t_1 为入渗进入第 II 阶段的时间, t_2 为入渗进入第 III 阶段的时间。

对式 (1) 进行积分可得到各阶段的累积入渗量 $H(t)$ 为

$$H(t) = \begin{cases} k t^\alpha & t \leq t_1 \\ \left[(i(t_1) - b t_1) t + b \frac{t^2}{2} \right]_{t_1}^t & t_1 < t \leq t_2 \\ f_0 (t - t_2) & t > t_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中 $k = \frac{k_0}{1 - \alpha_0}$; $\alpha = 1 - \alpha_0$; k 、 α 、 b 、 f_0 均为入渗参数。

2.3 渠床土壤有压点入渗模型参数与水深间的关系

入渗模型参数与土壤质地、结构、含水量和入渗水头有关, 当在渠道断面各点的土壤理化指标一定的情况下, 式 (2) 中的入渗参数 k 、 α 、 b 、 f_0 可以表达为入渗水头 h 的函数。经分析, 入渗参数与 h 间存在线性

关系, 图 2 为山西省灌溉试验站土样干容重为 1.45 g/cm^3 、含水量为 18.3% , 不同入渗水头条件下入渗参数与 h 之间的关系曲线。

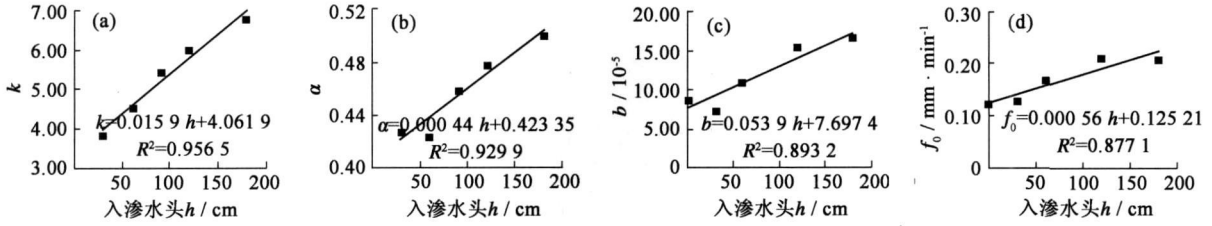


图 2 入渗参数随入渗水头变化曲线

Fig 2 Variation curves of infiltration model parameters with water head

当假定渠床土壤是均匀且各向同性的情况下, 土壤质地、干容重、含水量已知, 在渠道过水断面范围内各点的水深值不同, 由以上分析可知: k , α , b , f_0 可以表达为 h 的一元线性函数。

$$k = A_1 + B_1h, \quad \alpha = A_2 + B_2h, \quad b = A_3 + B_3h, \quad f_0 = A_4 + B_4h \quad (3)$$

式中 $A_i, B_i (i=1, 2, 3, 4)$ 为入渗参数。

3 渠道输水损失的点入渗量计算模型

图 3 为梯形断面渠道 (矩形渠道为梯形渠道 $z=0$ 的特例), 底宽为 B , 边坡系数为 z , 水深为 D 。由于水深的不同, 沿湿周各点的入渗压力势是变化的, 在渠道底宽 B 范围内, 水深为一定值 D , 在假设各点土壤理化指标相同的情况下, 各点某时刻累积入渗量和入渗率均相等, 在渠坡范围内水深由 0 递增至 D , 由于各点有压入渗模型参数可以表达为入渗水头 h 的一元线性函数, 其累积入渗量和入渗率可表达为 h 的函数, 因此可通过积分的方法求得渠坡范围内累积入渗量, 对渠道湿周范围内分渠底区域和渠坡区域对各点各阶段累积入渗量分别进行积分, 则可求整个断面上的各阶段累积入渗量。

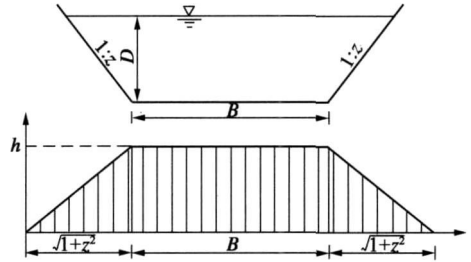


图 3 梯形渠道断面与沿湿周水分布示意图

Fig. 3 Sketch map of the trapezoid transect canal

(1) 自由入渗第一阶段

$$S_I = 2S_{I\text{边坡}} + S_{I\text{渠底}} = 2 \int_0^D k t^a dh + k(D) t^{a(D)} B = \frac{2\sqrt{1+z^2}}{B_2 \ln t} A_1 t^2 (t^{B_2 D} - 1) + \frac{2\sqrt{1+z^2}}{B_2 \ln t} B_1 t^2 \left[D t^{B_2 D} - \frac{1}{B_2 \ln t} (t^{B_2 D} - 1) \right] + k(D) t^{a(D)} B \quad (4)$$

(2) 自由入渗第二阶段

$$S_{II} = 2S_{II\text{边坡}} + S_{II\text{渠底}} = 2 \int_0^D \left[(i(t_1) - bt_1)t + b \frac{t^2}{2} \right]_{t_1}^t dh + \int_0^D (i(t_1) + bt)B dt = 2 \int_0^D \left[(A_1 A_2 + A_1 B_2 h + B_1 A_2 h + B_1 B_2 h^2) (t - t_1) t_1^{A_1 + B_1 h} dh + 2 \left[-A_3 t_1 t + A_3 t_1^2 + \frac{A_3 t^2 - A_3 t_1^2}{2} \right] h \right]_0^D + 2 \left[\left[-B_3 t_1 t + B_3 t_1^2 + \frac{B_3 t^2 - B_3 t_1^2}{2} \right] \frac{h^2}{2} \right]_0^D + \int_0^D (k(D) \alpha(D) t_1^{a(D)-1} + b(D) t) B dt = 2(t - t_1) \left[\int_0^D A_1 A_2 t_1^{A_1 + B_1 h} dh + \int_0^D (A_1 B_2 + B_1 A_2) h t_1^{A_1 + B_1 h} dh + \int_0^D B_1 B_2 h^2 t_1^{A_1 + B_1 h} dh \right] + 2 \left[\left[-A_3 t_1 t + A_3 t_1^2 + \frac{A_3 t^2 - A_3 t_1^2}{2} \right] h \right]_0^D + 2 \left[\left[-B_3 t_1 t + B_3 t_1^2 + \frac{B_3 t^2 - B_3 t_1^2}{2} \right] \frac{h^2}{2} \right]_0^D +$$

$$\left[k(D) \alpha(D) t_1^{\alpha(D)-1} (t - t_1) + b(D) \frac{t^2 - t_1^2}{2} \right] B \quad (5)$$

(3) 自由入渗第三阶段

$$S_{III} = S_{III\text{边坡}} + S_{III\text{渠底}} = 2 \sqrt{1+z^2} \int_0^D F_0(t-t_2) dh + f_0(D) B(t-t_2) = 2 \sqrt{1+z^2} \left[(t-t_2) (A_4 D + B_4 \frac{D^2}{2}) + (A_4 + B_4 D) B(t-t_2) \right] \quad (6)$$

$$S_i = S_I + S_{II} + S_{III} \quad (7)$$

式中 S_i 为从渠道放水开始后经过时间 t 的每米渠长渗漏量, m^3/m ; B 为渠底宽度, m ; D 为渠道水深, m ; z 为渠道边坡系数。

4 计算实例

假定渠道为梯形断面, 底宽 B , 边坡系数 z , 水深为 D , 地下水位埋藏很深或有良好的地下水出流条件, 地下水峰不致上升到渠底, 对渠道渗漏不产生影响, 渠道土壤理化指标已知。以山西省灌溉试验站渠道 (粘粒含量为 18.25%, 干容重为 1.45 g/cm^3 、含水量为 18.3%) 为例计算单位渠长渗漏量, 将入渗参数 ($A_1 = 4.0619$, $B_1 = 0.0159$, $A_2 = 0.4233$, $B_2 = 0.00044$, $A_3 = 7.697 \times 10^{-5}$, $B_3 = 5.40 \times 10^{-7}$, $A_4 = 0.1252$, $B_4 = 0.00056$) 和渠道断面参数 ($B = 1.0 \text{ m}$, $z = 1.0$, $i = 0.2 \times 10^{-3}$) 代入式 (4) ~ 式 (7), 可求得不同时刻单位长渠道入渗量的累积值。

根据明渠均匀流计算公式, 计算出已知断面参数渠道在一定水深条件下的过流量, 将流量代入考斯加科夫经验公式 (8), 可求得不同时刻单位长渠道渗漏量。

$$Q_{\text{损}} = 0.04LQ_n^{1-m} \quad (8)$$

式中 $Q_{\text{损}}$ 为渠道输水损失流量, m^3/s ; A 为渠床土壤透水系数; m 为渠床土壤透水指数; L 为渠道长度, km ; Q_n 为渠道净流量, m^3/s 。

利用本文计算模型和考斯加科夫经验公式 (8) 对渠道输水渗漏量的计算结果见表 1。

表 1 渠道输水渗漏量计算成果

Table 1 Calculating results of canal seepage

时间 h m in	最小流量 $0.52 \text{ m}^3/\text{s}$				设计流量 $1.06 \text{ m}^3/\text{s}$				加大流量 $1.38 \text{ m}^3/\text{s}$			
	计算模型		经验公式		计算模型		经验公式		计算模型		经验公式	
	入渗量 m^3	入渗率 $\text{I}/(\text{cm}^3 \cdot \text{m} \cdot \text{in}^{-1})$	入渗量 m^3	入渗率 $\text{I}/(\text{cm}^3 \cdot \text{m} \cdot \text{in}^{-1})$	入渗量 m^3	入渗率 $\text{I}/(\text{cm}^3 \cdot \text{m} \cdot \text{in}^{-1})$	入渗量 m^3	入渗率 $\text{I}/(\text{cm}^3 \cdot \text{m} \cdot \text{in}^{-1})$	入渗量 m^3	入渗率 $\text{I}/(\text{cm}^3 \cdot \text{m} \cdot \text{in}^{-1})$	入渗量 m^3	入渗率 $\text{I}/(\text{cm}^3 \cdot \text{m} \cdot \text{in}^{-1})$
60	0.105	17.38	0.031	5.10	0.191	25.00	0.049	8.10	0.220	28.81	0.058	9.67
200	0.179	5.35	0.102	5.10	0.332	7.91	0.162	8.10	0.384	9.18	0.192	9.67
360	0.264	5.31	0.184	5.10	0.484	7.45	0.292	8.10	0.555	8.39	0.346	9.67
720	0.455	5.30	0.367	5.10	0.818	7.30	0.583	8.10	0.934	8.27	0.692	9.67
1440	0.833	5.25	0.734	5.10	1.486	7.30	1.167	8.10	1.692	8.27	1.385	9.67
2880	1.589	5.25	1.469	5.10	2.825	7.30	2.333	8.10	3.208	8.27	2.77	9.67

5 结果分析

由表 1 可以看出: 渠道输水初期, 由点入渗参数计算模型计算的结果远大于经验公式计算的结果, 随着入渗时间的推移, 其差值逐渐减小, 比较设计流量情况下点入渗参数计算模型和经验公式计算的入渗量, 从 60 m in 到 1440 m in 二者的比值由 3.9 倍减小为 1.3 倍, 分析其原因, 主要是由于经验公式没有考虑非饱和土壤入渗过程中入渗率变化的影响, 从表中可以看出, 设计流量情况下点入渗参数计算模型计算的 60 m in 单位长渠道平均入渗率是经验公式计算的入渗率的 3.1 倍, 由于非饱和土壤入渗率随入渗时间逐渐减小, 1440 m in 二者的比值为 0.90, 由此可以看出, 经验公式仅适用于计算渠道稳定自由渗漏阶段的渗漏量。

分析不同流量条件下由点入渗参数计算模型计算的单位长渠道平均入渗率, 其值由大到小, 当时间足够长时为一定值, 表 1 中 1440 min 后所有流量条件下的平均入渗率都不再变化, 和经验公式计算的平均入渗率比较, 当输水流量由最小流量变化到最大流量时, 其比值由 1.03 减小至 0.86。分析其原因主要是由于经验公式不能反映过水断面变化和水深变化对入渗率的影响, 因此, 当输水流量小于设计流量时经验公式计算的计算结果偏小, 当输水流量大于设计流量时其计算的计算结果偏大。

由以上分析可以看出, 本文建立的计算模型可以反映渠道输水过程中渠道土壤土质、干容重、含水量和渠道水深对渗漏量的影响, 计算结果更为合理。

6 结 论

对于给定土壤质地、干容重和含水量的任何渠床, 其入渗参数都可以表达为入渗水头的函数, 呈线性关系。基于自由渗漏情况下有压点入渗过程的经验模型及其入渗模型参数与入渗水头间的关系, 利用沿湿周积分的方法可求得渠道断面的累积入渗量随时间的关系函数, 从而求得渠道输水渗漏量。计算实例的精度分析表明基于点入渗参数推导的计算模型计算渠道输水渗漏量时具有较高的精度, 因此通过点有压入渗模型参数计算渠道输水渗漏量是可行的。

本文建立的计算模型通过入渗模型参数反映渠道输水过程中渠道水深对渗漏量的影响, 与传统经验公式计算结果相比更为合理。但渠床土质、干容重、含水量和渠道水深与入渗参数间的数量关系还有待进行更深入的研究。

参考文献:

- [1] 罗玉峰, 崔远来, 郑祖金. 河渠渗漏量计算方法研究进展 [J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 444-449. (LUO Yu-feng CUI Yuan-li ZHENG Zu-jin Research progress on methods of quantifying seepage from rivers and canals [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(3): 444-449. (in Chinese))
- [2] 雷声隆, 罗强, 张瑜芳, 等. 防渗渠道输水损失的估算 [J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(3): 7-10. (LEI Sheng-long LUO Qiang ZHANG Yu-fang et al Estimating seepage loss of lined canal [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(3): 7-10. (in Chinese))
- [3] 门宝辉. 渠道流量损失及水利用系数公式的探讨 [J]. 中国农村水利水电, 2000(2): 33-34. (MEN Bao-hui Discussion on flow loss of canal and formula of water utilization coefficient [J]. China Rural Water and Hydropower, 2000(2): 33-34. (in Chinese))
- [4] 白美健, 谢崇宝, 许迪, 等. 渠道输水损失计算公式中用平均流量代替净流量的误差分析 [J]. 中国农村水利水电, 2001, 1(6): 33-34. (BAI Mei-jian XIE Chong-bao XU Di et al Error analysis of using average flow instead of net flows in the formula of canal water delivering loss [J]. China Rural Water and Hydropower, 2001, 1(6): 33-34. (in Chinese))
- [5] 荣丰涛. 议论考斯加可夫经验公式 [J]. 山西水利科技, 2004(2): 7-10. (RONG Feng-tao Discussion of Kosjakov empirical formula [J]. Shanxi Hydropower, 2004(2): 7-10. (in Chinese))
- [6] 王少丽, THIELEN R, 李祥福, 等. 渠道渗漏量的试验及分析方法 [J]. 灌溉排水, 1998(2): 39-42. (WANG Shao-li THIELEN R, LI Xu-fang et al Tests and analysis method of canal seepage [J]. Irrigation and Drainage, 1998(2): 39-42. (in Chinese))
- [7] 王慧芳, 邵明安. 含碎石土壤水分入渗试验研究 [J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 604-609. (WANG Hui-fang SHAO Ming-an Experimental study on water infiltration of soil containing rock fragments [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(5): 604-609. (in Chinese))
- [8] 江崇安, 高华, 范守伟, 等. 对渠道渗漏量计算方法的探讨 [J]. 节水灌溉, 2005(5): 28-32. (JIANG Chong-an GAO Hua FAN Shou-wei et al Discussion on calculation method for seepage quantity of canal [J]. Water Saving Irrigation, 2005(5): 28-32. (in Chinese))
- [9] 胡克林, 肖新华, 李保国. 不同类型下边界条件对模拟灌溉农田水分渗漏的影响 [J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 665-670. (HU Ke-lin XIAO Xin-hua LI Bao-guo Numerical analysis of the effect of the different lower boundary conditions on water drainage in irrigated field [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(5): 665-670. (in Chinese))

Method for calculating seepage losses from earth-lined irrigation channels based on point cumulative infiltration*

LI Hong-xing FAN Gu-rsheng

(College of environment Science and Engineering of Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024 China)

Abstract Based upon the point experiments on pressure infiltration processes in an unsaturated earth-lined channel, an empirical model for calculating seepage losses from earth-lined irrigation channels is developed. The parameters of model are empirically correlated with the water depth in the channel. The seepage loss is estimated through integrating the cumulative infiltration along the channel wetted perimeter. The model is validated with the experimental data. The result shows that the model can have a better performance on seepage loss estimation than that of using the Kostikov infiltration model that is also empirically based. The simulated seepage loss process using the model agrees well with the observation, which demonstrates the feasibility of using the point cumulative infiltration approach to calculate seepage losses from earth-lined irrigation channels.

Key words unsaturated soil water head of infiltration; channel seepage loss; pressured water infiltration; calculation model

征稿启事

《水科学进展》是以水为论述主题的学术期刊，主要反映国内外在暴雨、洪水、干旱、水资源、水环境等领域中科学技术的最新成果、重要进展、当代水平和发展趋势，报道关于水圈研究的新事实、新概念、新理论和新方法，交流新的科研成果、技术经验和科技动态；她涉及与水有关的所有学科，包括水文科学、大气科学、海洋科学、地质科学、地理科学、环境科学、水利科学和水力学、冰川学、水生态学以及法学、经济学和管理科学中与水有关的内容。

本刊热诚欢迎广大水科学工作者踊跃投稿，尤其欢迎以下几方面的稿件：

- 1、题材较重大，能为国家对与水有关的重大问题的决策提供科学依据的稿件；
- 2、反映水科学各分支学科重要研究成果尤其是前沿课题的稿件；
- 3、探讨水圈与地球其他圈层相互关系及水与社会发展相互关系等宏观科学问题的稿件；
- 4、报道对推动水科学发展有重要意义的新事实、新概念及新途径的稿件；
- 5、运用多学科的理论与方法探讨水科学基础理论（尤其是跨学科的生长点）与实际问题的稿件；
- 6、介绍有推广价值，思路新颖的技术方法和经验的稿件。

《水科学进展》编辑部

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40671081).