

沐官岛水库蓄水初期盐分运移数值模拟

赵全升¹, 鲁 静², 邵争平³, 高增文⁴, 冯 娟¹

(1. 青岛大学环境科学系, 青岛 266071; 2. 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

3. 新疆地质工程勘察院, 乌鲁木齐 830091; 4. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266003)

摘要: 沐官岛水库是一个拟建的河口海湾水库, 库底为富含咸水的潮滩沉积物。这一特殊的地质及水环境条件直接关系到水库未来的水质安全和正常的调度运行, 所以必须准确地确定水库水体中盐分空间分布这一关键问题。本文依据现场调查、钻探及室内实验资料, 通过垂直方向线性插值技术, 建立了沐官岛水库蓄水初期盐分运移三维模型, 模拟了水库蓄水初期在内源盐分释放影响下, 库水盐分的演化过程。结果表明: 若遇平水年开始蓄水, 当蓄水至 1.5m 时, 该层含盐量在平面上的变化范围主要在 0.30~1.30g/L 之间; 当蓄水至 4.5m 时, 该层含盐量在平面上的变化范围主要在 0.30~1.55g/L。

关键词: 海湾水库; 蓄水初期; 盐分运移; 数值模拟

中图分类号: P342⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2008)04-0006-05

在沿海地区, 兴建河口海湾水库是解决水资源短缺问题的重要途径之一, 已越来越引起人们的重视。但在许多已建成的海湾水库中, 由于库内积存海水和底质盐分释放等原因, 经常出现库水返咸现象, 使表层水的含盐量超标。尤其在枯水季节, 经常出现库内水体含盐量高于 1.0g/L 的情况, 从而严重影响水库的水质和正常供水。因此, 模拟水库蓄水初期在内源盐分释放影响下库水水质的演化过程, 以便为水质淡化调控提供科学依据具有十分重要的实际意义。

海湾水库蓄水过程盐分运移的模拟是一个需重点研究的问题。库水水质除与流入水库各河流的水质有关外, 在水库建成后(特别是蓄水初期), 库内残留海水和库区不同底质中盐分的扩散特征将直接决定着库水将来的淡化速度和水质^[1]。一些学者指出, 沉积物与水体之间的物质交换是影响湖水、河水水质的重要因素^[2~4]。陈俊合等建立了阿哈水库三维铁、锰迁移模型^[5]。杨具瑞等将滇池水体沿垂向分为二层, 考虑底质总氮释放, 建立了预测水体总氮浓度分布的二维模型^[6]。Nie 等建立了北京密云水库总磷运移的三维模型^[7]。

由于沐官岛水库库底为富含咸水的潮滩沉积物,

所以底质盐分的扩散特征及变化过程将决定水库水质的淡化速度和水质。当水库蓄水后, 特别是在蓄水初期, 应进行不同水动力条件和不同工程条件下盐分运移规律的研究。为此, 必须建立反映水库盐分运移规律的模拟模型, 以便为水质预测和水质淡化调控提供科学依据。

1 自然地理概况

沐官岛水库位于山东省胶南市西南部横河河口海湾处。地理坐标为 119°30'~120°11'E, 35°35'~36°8'N。沐官岛水库大坝东起泊里镇董家口, 经过沐官岛, 西至黄石岚嘴。主坝长约 7km, 大坝内海湾面积为 25km², 库底平均高程在 -3.5m 左右, 正常蓄水水位 4.0m, 蓄水水深 7.5m 左右, 总库容为 1.6×10⁸m³。

本区 1~5 月平均风速较大, 在 4.0~4.5m/s 之间。6~12 月平均风速较小, 在 3.3~3.9m/s 之间, 年平均风速 3.9m/s; 年均降水量为 794.9mm, 多集中于 6~9 月份; 年均蒸发量为 1541.5mm。

2 地质条件

2.1 地形、地貌及构造特征

自古生代以来, 本区地壳缓慢上升, 随着构造运动的发展, 形成了隆起和断陷盆地相间的格局, 奠定了本区港湾式海岸发育基础。中生代断裂明显地控制了海岸轮廓和海岸地貌特征。在棋子湾沿岸, 广泛发育侵蚀、剥蚀残丘和准平原。在河口及滨海附近, 有海积或冲积平原分布, 湾内海底向南倾斜。

收稿日期: 2008-01-11; 修订日期: 2008-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(40772151); 山东省自然科学基金(Y2006E03); 青岛市科技发展计划项目

作者简介: 赵全升(1963-), 男, 教授, 博士, 主要从事环境系统数值模拟、规划与管理研究。

E-mail: zqs0811@sina.com

2.2 库底松散沉积物特征

库底 - 3.5m 高程岩性在平面上的沉积物类型分为 3 个区,分别为:泥质粉砂区、粉质粘土区和中细砂区。泥质粉砂层由泥、砂、粉砂组成,含贝壳及贝壳碎片。沉积松散,含水量大,呈软塑状态,厚度大致在 4 ~ 10m 之间;粉质粘土层由粘土、砂组成,具有粘性,该层厚度一般在 0 ~ 3m 之间,变化规律为沿岸薄,向湾里、湾口逐渐变厚;砂层主要由中粗砂、中细砂组成,沉积较密实。在这 3 个区分别取样进行室内物理模拟试验,确定出各区库底盐分的扩散通量,相应地划分出 3 个不同的扩散通量区(图 1)。沉积物总体厚度一般在 3 ~ 17m 之间,由岸边向湾口、湾内逐渐加大。沐官岛水库西侧沉积物厚度大于东侧。

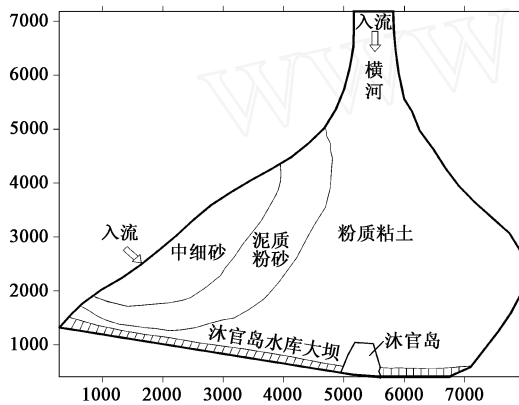


图 1 水库库底岩性及相应扩散通量分区图

Fig. 1 Zoning of lithology and the corresponding diffusion flux at reservoir bottom

2.3 水环境

通过对库水水质结果分析,白马河河水的含盐量为 0.211g/L,近岸海水的含盐量为 26.705g/L。拟建库区位于海岸潮间带,库底沉积物中的氯离子、镁离子、硬度和矿化度均较高。建库后,库底沉积物中的溶质会通过分子扩散不断进入水库中的淡水体,从而对水库水质产生一定的影响。

3 沐官岛水库蓄水初期盐分运移数值模型

通过对沐官岛水库水 - 盐条件的分析,认为水库水体盐分的空间分布及其变化特征主要受沉积物中盐分的分子扩散、水体对流 - 弥散及蒸发作用等因素影响。因此,按以下步骤建立沐官岛水库盐分运移的准三维模拟模型。

3.1 水库平面二维水质模型

沐官岛水库蓄水初期,当蓄水至某一深度(如达到

水深为 $H(m)$ 的平面),则得到平面二维水质模型^[8]。如果进一步模拟不同水深的溶质分布,可在二维水质模拟问题的基础上,通过垂直方向的线性插值进行准三维水质模拟,具体见公式(1):

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + V_x \frac{\partial C}{\partial x} - V_y \frac{\partial C}{\partial y} \\ + \varepsilon_1 C^* - \varepsilon_2 C + I(x, y) \quad G, 0 < t \leq T \\ C|_{t=0} = C_0(x, y) \quad (x, y) \in \bar{G} \\ \left[\left(V_x C - D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \cdot n_x + \left(V_y C - D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \cdot n_y \right] \Big|_{\Gamma} \\ = q(x, y, t) \quad (x, y) \in \Gamma, 0 < t \leq T \end{cases} \quad (1)$$

式中: $C(x, y, t)$ ——溶质浓度 (mg/L);

$C^*(x, y, t)$ ——大气降水中所含的溶质浓度 (mg/L);

D_x, D_y ——分别为 x, y 方向的扩散(包括扩散、弥散过程)系数 (m^2/d);

V_x, V_y ——分别为水流在 x, y 方向上的流速分量 (m/d);

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ ——分别为水库水体单位时间内单位体积的补给量和蒸发量 ($1/d$);

I ——底部源项 ($mg/(m^3 \cdot d)$);

q ——通过二类边界上的溶质通量 ($mg/(m^2 \cdot d)$);

n_x, n_y ——为 x, y 方向的法向量方向数。

根据水库水文地质及水环境条件分析,可以将水库整个边界视为二类边界。对于沐官岛水库,其侧向扩散通量 $q(x, y, t) = 0$ 。

对于河流入流补给强度,采用

$$S = Q^{(in)} C^{(in)}(x, y) \quad \Gamma_{in}, 0 < t \leq T$$

式中: S ——入流补给强度;

Γ_{in} ——入库边界;

$Q^{(in)}$ ——入库流量;

$C^{(in)}$ ——入库浓度。

按 Galerkin 法建立(1)的有限元方程^[9]。以基函数为权乘方程的两端,在 G 域上积分,通过分部积分法或格林公式,利用单元浓度的线性插值函数关系并用梯形法求解,待蓄水至某一水深为 $H(m)$ 时的平面有限元方程为:

$$\sum_{i=1}^{n_p} \left(M_{ij} + \frac{K_{ij}}{2} \Delta t_l \right) C_i^l = \sum_{i=1}^{n_p} \left(M_{ij} - \frac{K_{ij}}{2} \Delta t_l \right) C_i^{(l-1)} + \frac{f_i^l + f_i^{(l-1)}}{2} \Delta t_l \quad (2)$$

$$j = 1, 2, \dots, n_p, l = 1, 2, \dots, n,$$

$$\Delta t_l = t_l - t_{l-1}, C_i^{(0)} = C_i(t_l).$$

3.2 垂直方向线性插值的准三维模拟方法

由于沐官岛水库水体盐分运移具有垂向浓度扩散的明显特征,因此,在充分考虑平面水质模拟的情况下,求解平面以外其它任意高程点的盐分浓度,对于沐官岛水库水体的盐分运移模拟是关键的技术问题。为此,依据数值理论分析,给出垂直方向线性插值的准三维盐分运移模拟方法。

在蓄水过程中,对于每个给定蓄水深度为 z_0 的水平层面,通过二维有限元方法,按一定时间步长 Δt 求出该层面上 t 时刻所有节点的浓度值 $C(x_i, y_i, z_0, t)$, 这样,该层面上任意一点 (x, y, z_0) 的浓度可通过该点所在单元 $\Delta\beta$ 相应的插值多项式求出; 确定三维水体中任意一点 $p(x, y, z, t)$ 的浓度: 首先判断 p 点是否属于已知的某一蓄水平面,若属于已知的某一蓄水平面,则直接应用平面二维溶质运移模型解出该平面上的浓度分布,即可得到点 $p(x, y, z, t)$ 的浓度;

若不属于已知的某一蓄水平面,先确定垂直方向上 p 点所对应的上下两个水平层面上的点 $p_1(x, y, z_1, t)$ 和 $p_2(x, y, z_2, t)$, 然后通过有限元方程分别解出这两个水平面上的浓度 $C_1(x, y, z_1, t)$ 和 $C_2(x, y, z_2, t)$;

应用线性插值方法求出点 $p(x, y, z, t)$ 的浓度 $C(x, y, z, t)$ 为:

$$C(x, y, z, t) = \frac{[C_2(x, y, z_2, t) - C_1(x, y, z_1, t)] \cdot z}{z_2 - z_1} + \frac{C_1(x, y, z_1, t)}{z_2 - z_1} - \frac{C_2(x, y, z_2, t)}{z_2 - z_1}$$

依据上述步骤,通过垂直方向线性插值方法,求得三维水体中任意一点 $p(x, y, z, t)$ 的浓度。

3.3 可靠性分析

溶质浓度变化函数 $C(x, y, z, t)$ 可视为连续可导函数。根据泰勒公式,一定可以作线性逼近。在上述模型中,上、下相邻两个水平层面之间的距离 $|z_1 - z_2| \leq 7.5\text{m}$ (蓄水水深),在实际坐标系中,比任何一个有限元剖分的三角形单元的边长都要小得多。所以,上、下相邻两个水平层面之间垂直方向的线性插值误差反而小于任何一个水平层面三角形单元上的二次线性插值误差。依据线性插值理论,只要层间距离足够小,那么在垂直方向作线性插值的准三维水质模型解与实际三维水质模型有限元解之间的差值就很小。因此,对于实际三维水体中任意一点的浓度 $C(x, y, z, t)$, 应

用垂直方向线性插值的准三维水质模型计算所产生的误差在允许范围之内,且计算精度完全可以满足水质预测要求。

4 基础数据

4.1 平面剖分、流场及溶质数据

沐官岛水库正常蓄水水位高程在 4.0m,相应的水面面积为 25km^2 。据此,将沐官岛水库水体在平面上剖分三角形单元 361 个,节点总数为 211 个,其中内节点数 152 个,边界节点数 59 个。

沐官岛水库蓄水初期盐分运移模拟,初始浓度为拦蓄的河流实测盐分浓度。大气降水量、水面蒸发量和来水量数据分别依据典型年份的月平均资料。引水量依据规划值,日均用水量为 $22 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 。常风向为西北风,北偏西 $10 \sim 50^\circ$,柯氏力常数 $f = 2\Omega \sin\varphi$, Ω 为地球自转角速度,约为 $2\pi/(24 \times 3600) 1/\text{s}$; φ 为计算区域的纬度,即 $35^\circ 35' \sim 36^\circ 8'$ 。

沐官岛水库库底平缓,水面平坦、开阔。蓄水后,除入库和出库口附近有一定流速外,其余各点流速均不大。模拟流场均能较好地反映沐官岛水库在西北风和两个入流口处水流作用下的流场分布。

4.2 参数确定

根据规划沐官岛水库的规模、水文及水环境条件,并参考青岛地区其它滨海水库的实测资料,确定沐官岛水库水体的流速和参数。选取的横向扩散系数 $E_x = 1.5 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ 、纵向扩散系数 $E_y = 7.5 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ 、垂向扩散系数 $E_z = 3.5 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ 。

5 水库含盐量分布的模拟与结果分析

沐官岛水库库区的降水具有年际变化较大和年内分配不均的特点,且多集中在 6~9 月份,该月份多年平均降水量为 562mm (1960~2005 年),占年降水量的 70.1%。所选择的蓄水时间应在 6~9 月份。为此,本次模拟计算的初始时刻为 6 月 1 日,并按丰水年、平水年和枯水年三个典型年份分别计算蓄水初期含盐量变化过程。模拟过程中,为反映垂向的浓度扩散变化,并考虑为将来水质淡化调控措施提供更详尽的信息,特别对每一年的蓄水过程中,在不同蓄水深度时给出浓度分布,即进行水体的动态模拟。

以平水年为例分析沐官岛水库蓄水初期水库含盐量的变化。若沐官岛水库遇平水年开始蓄水,根据平水年份的来水、降水及蒸发量数据计算。该年份蓄水,可蓄至 4.5m 的水深。据此,选择蓄水过程中达到

1.5m 和 4.5m 两个蓄水深度时的对应层面进行模拟。

将平水年盐分运移模拟模型的基础数据代入模型,输入初始值后,时间步长按 $\Delta t = 60s$ 进行求解,可分别得到蓄水至 1.5m 和 4.5m 两个位置时的含盐量分布结果。

(1) 蓄水至 1.5m 时的含盐量分布

该层选择的蓄水初期模拟时间是 78d,含盐量分布见图 2。

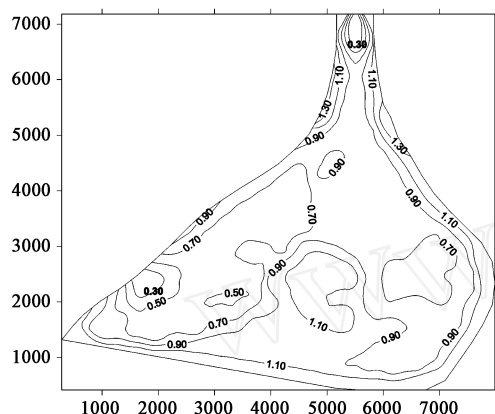


图2 蓄水至 1.5m 时含盐量分布等值线图

Fig.2 The contour map of salinity to 1.5m water level

由图 2 可以看出,该层含盐量在平面上的变化范围主要在 0.30 ~ 1.30g/L。对于水体内部区域,由高到低依次为:含盐量变化范围主要在 0.70 ~ 1.10g/L,分布在粉质粘土区;含盐量变化范围主要在 0.50 ~ 0.90g/L,分布在泥质粉砂和中细砂区。对于水体周边处,由高到低分布依次为:含盐量变化范围主要在 1.10 ~ 1.30g/L,分布在水体东部和南部边界处;含盐量变化范围主要在 0.90 ~ 1.30g/L,分布在水体西部边界处;含盐量主要在 0.30g/L 左右,分布在两个入流口处。

(2) 蓄水至 4.5m 时的含盐量分布

该层选择蓄水初期模拟时间是 365d,含盐量分布见图 3。

由图 3 可以看出,该层含盐量在平面上的变化范围主要在 0.30 ~ 1.55g/L。水体内部区域由高到低分布依次为:含盐量变化范围主要在 0.80 ~ 1.05g/L,分布在粉质粘土区;含盐量变化范围主要在 0.30 ~ 0.80g/L,分布在泥质粉砂和中细砂区。对于水体周边处,由高到低分布依次为:含盐量变化范围主要在 1.30 ~ 1.55g/L,分布在水体东部和南部边界处;含盐量变化范围主要在 0.80 ~ 1.05g/L,分布在水体西部边界处;含盐量主要在 0.30g/L 左右,分布在两个入流口

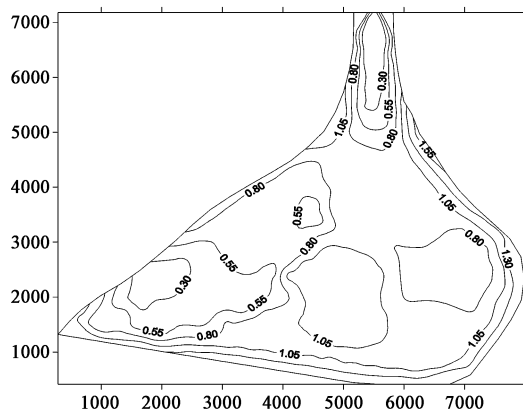


图3 蓄水至 4.5m 时含盐量分布等值线图

Fig.3 The contour map of salinity to 4.5m water levels

处。该层含盐量的高低分布规律总体上与第一层相近,只是在两个入流口处的含盐量比第一层略低。该层的最高含盐量达 1.55g/L 以上,而第一层的最高含盐量达 1.30g/L 以上,这是由于该层的模拟时间是 365d,而第一层的模拟时间是 78d,即底质盐分在第二层的扩散持续时间比第一层多 287d 所致。

含盐量的分布特点与库底多孔介质的岩性及水流条件密切相关。本次室内物理模拟试验,对三种不同的岩性分别取样进行通量测定。结果是粉质粘土的扩散通量最大,其次是中细砂和泥质粉砂。因而,在其上部水体中,含盐量的高低分布与其下部不同岩性扩散通量的大小分布相吻合,即高扩散通量区对应上部的高浓度分布区,低扩散通量区对应上部的低浓度分布区。在两个入流口处,由于是淡水入流,局部流速较大,混合稀释作用较强,故该处的含盐量在整个区域为最低。对水库水体的周边,其含盐量要稍高于水体内部,这主要是由于周边的水流速度更低,由对流作用引起的盐分运移相对较弱所致。另外,东部和南部边界处的含盐量高于水体西部边界处的含盐量。这是由于在东、南部边界处,其下部的岩性是粉质粘土,而在西部边界处,其下部的岩性是中细砂。

6 结论

沐官岛水库蓄水后,淡水体直接与其下部富含咸水的多孔介质相接触,淡水与库底沉积物中咸水之间的盐分交换是一个复杂的物理化学过程。在这样一种水环境条件下,盐分浓度在垂向上存在较大的梯度,并且受不同季节、水库入流、出流和风力等因素的影响,水体含盐量将在平面和剖面上产生复杂的动态变化。本文所建立的水库水体盐分运移模拟模型较好地反映

了盐分在时、空两方面的变化规律。

由于沐官岛水库水体盐分运移具有垂向浓度扩散的明显特征,在充分考虑平面盐分运移模拟的情况下,求解平面以外其它任意高程点的盐分浓度对于沐官岛水库水体的盐分运移模拟是非常关键的技术问题。为此,我们依据数值分析理论和计算机软件技术,提出了垂直方向线性插值的准三维数值模拟方法,并进行了可靠性分析。应用表明,这一方法对于具有较大垂向浓度梯度的海湾水库水质模拟问题是有效和可靠的。

平水年开始蓄水时,选择 1.5m 和 4.5m 两个蓄水深度时的对应层面进行模拟。结果表明:当蓄水至 4.5m 时,该层含盐量在平面上的变化范围主要在 0.30 ~ 1.55g/L,在粉质粘土区和水体周边处,含盐量大于 1.0g/L 的水体呈现局部性分布。

参考文献:

- [1] 张爱利,赵其芬,蒋志文. 山东省兴建河口海湾水库前景预测[J]. 山东水利,1999(6):29-30.
- [2] Higashino M, Stefan H G, Gantzer C J. Periodic diffusional mass transfer near sediment/water interface: theory[J]. Journal of Environmental Engineering, 2003, 129(5): 447-455.
- [3] Portielje R, Lijklema L. Estimation of sediment-water exchange of solutes in Lake Veluwe, The Netherlands[J]. Water Research, 1999,33(1):279-285.
- [4] Elliott A H, Brooks N H. Transfer of nonsorbing solutes to a streambed with bed forms theory [J]. Water Resources Research, 1997, 33(1):123-136.
- [5] 陈俊合,陈小红. 水库三维 Fe、Mn 迁移模拟——阿哈水库实例研究[J]. 水科学进展,1999,10(1):14-19.
- [6] 杨具瑞,方铎. 滇池二维分层水质模拟研究[J]. 环境科学学报,2000,20(5):533-536.
- [7] Nie J, Yang T X, Liu X D. Three-dimension mathematical model of total phosphor in the reservoir and application [J]. Chemical Research in Chinese Universities, 2004, 20(3):294-298.
- [8] 马瑞杰,杨天行,刘晓端. 总磷运移二维模型的有限元法[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2003,33(2):200-203.
- [9] 孙诤正. 地下水污染数学模型和数值方法[M]. 北京:地质出版社,1989:164-207.

Numerical simulation of salinity transport for initial impoundment of Muguandao reservoir

ZHAO Quan-sheng¹, LU Jing², SHAO Zheng-ping³, GAO Zeng-wen⁴, FENG Juan¹

(1. Department of Environmental Science, Qingdao University, Qingdao 266071, China;

2. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China;

3. Xinjiang Institute of Geological Engineering Exploration, Urumqi 830091, China;

4. Institute of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: Muguandao reservoir is a proposed estuarine project and at the bottom are tidal deposits laden with salt water. In such a special geological and water environment, salt water in the deposits will intrude into the overlying fresh water, which will affect the water quality and normal operation of the reservoir. It is therefore important to identify the spatial extent of salt. Based on site survey, drilling and laboratory data, a quasi-3D model is established by linear interpolation in vertical direction, simulating the migration of salt in the initial impoundment of the reservoir. As a result, if the impoundment happens in the normal water year, at the level of 1.50m, salinity ranges at 0.30g/L to 1.30g/L; and at the level of 4.5m, salinity varies from 0.30g/L to 1.55g/L.

Key words: estuarine reservoir; initial impoundment; salt transfer; numerical simulation

责任编辑:王宏